



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MATIAS HYTTI  
VOIMALAITOKSEN KÄYTÖNAIKAISEN OPTIMOINNIN ONLINE-  
SEURANTATYÖKALUN SUUNNITTELEMINEN

Diplomityö

Tarkastaja: professori Antti Oksanen  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Luonnontieteiden tiedekuntaneuvos-  
ton kokouksessa 12. elokuuta 2015

## TIIVISTELMÄ

**HYTTI, MATIAS:** Voimalaitoksen käytönaikaisen optimoinnin online-seurantatyökalun suunnitteleminen  
Tampereen teknillinen yliopisto  
Diplomityö, 56 sivua, 4 liitesivua  
Elokuu 2015  
Energiatekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma  
Pääaine: Voimalaitos- ja polttotekniikka  
Tarkastaja: professori Antti Oksanen

**Avainsanat:** energiatehokkuus, käytönaikainen optimointi, voimalaitos, kattilahyötysuhde

Diplomityö on tehty yhteistyössä Metsä Boardin ja Hämeenkyrön Voiman kanssa. Työn tarkoituksena on ollut suunnitella helppolukuinen online-seurantatyökalu voimalaitoksen henkilökunnalle käytönaikaista optimointia varten. Työn kohteena on toiminut Hämeenkyrön Voiman CHP-voimalaitos Metsä Boardin kartonkitehtaan yhteydessä. Energiatehokkuuden jatkuvatoimisella seuraamisella pyritään vähentämään kasvihuonekaasujen määrää ja maksimoimaan polttoaineesta saatava hyöty. Online-seurantatyökalun perusteella voimalaitoksen käyttöhenkilökunta voi seurata voimalaitoksen energiatehokkuutta reaaliajassa eri toimintapisteissä ja reagoida välittömästi mahdollisiin epäkohtiin toiminnan optimoimiseksi.

Euroopan unionin asettamat energiatehokkuusdirektiivit määrittelevät vaatimukset voimalaitosten energiansäästötoimenpiteille ja päästöjen pienentämiselle. Suomessa velvoitteen toimeenpanoa edistetään energiatehokkuussopimusten avulla. Energiatehokkuustoimenpiteiden raportointi on oleellinen osa Suomen energiasäästön raportointia EU:lle.

Työ voidaan karkeasti jakaa kolmeen osa-alueeseen: teoriaosuuteen, online-seurantatyökalun suunnitteluprosessiin sekä käytännön toteutukseen. Teoriaosassa käydään läpi yleisellä tasolla höyryprosessia sekä tarkemmin Hämeenkyrön voimalaitoksella käytössä olevia leijupetikattilaa ja vastapaineturbiinia. Lisäksi pohditaan kiinteän polttoaineen vaikutusta energiatehokkuuteen sekä muita voimalaitoksen käytönaikaiseen optimointiin vaikuttavia osatekijöitä. Suunnitteluosuus sisältää tutkimusta lähtötietojen keräämisestä ja sopivien mittareiden valinnasta. Suunnittelu aloitettiin selvittämällä voimalaitoksen energiatehokkuuden kannalta tärkeimmät kohteet, joista otollisimmin käytönaikaiseen optimointiin soveltuvat valikoitiin mittareiksi. Mittareiden tulkinta pohjautuu historiadatan perusteella luotuihin referenssiarvoihin. Lopussa havainnollistetaan käytännön toteutusta automaatiojärjestelmään ohjelmoiduista seurantänäytöistä ja kootaan yhteen koejaksolla selville saadut johtopäätökset.

## ABSTRACT

**HYTTI, MATIAS:** Designing online-monitoring tool for optimizing power plant's energy efficiency

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 56 pages, 4 Appendix pages

August 2015

Master's Degree Programme in Energy Technology

Major: Power Plant and Combustion Technology

Examiner: Professor Antti Oksanen

**Keywords:** energy efficiency, online-monitoring, power plant, boiler's efficiency, optimization

This master's thesis has been done in cooperation with Metsä Board and Hämeenkyrön Voima. The purpose of the thesis has been to design online-monitoring tool for power plant's staff. The subject plant has been Hämeenkyrö Voima's CHP power plant located at Metsä Board's Kyrö mill. Online-monitoring of energy efficiency aims to reduce the greenhouse gas emissions and maximize the benefits of the biofuel. The operation staff is able to oversee power plant's energy efficiency in real time within different operating points with the online-monitoring tool and react to possible malfunctions immediately for optimizing the process.

The European Union's Energy Efficiency Directive (EED) defines requirements for power plant's energy saving measures and reducing emissions. Implementation of these obligations is improved with energy efficiency agreements in Finland. The reportage of energy efficiency implementations is an essential part of Finland's energy saving reporting to the European Union.

This thesis can be roughly separated into three different parts: the theoretical part, designing process of the online-monitoring tool and practical application. The theoretical part reviews the steam process in general and more accurate focus given to fluidized bed combustion along with back pressure turbine used at Hämeenkyrö's power plant. The impact of solid fuels on energy efficiency and other factors affecting the power plant's optimization are also contemplated. The designing part contains research of collecting initial data and selection of valid indicators. The designing was launched by examining the most important targets of power plant's energy efficiency and the most adequate were selected as indicators for online-monitoring. Interpretation of the indicators is based on reference values formed from history data. Finally, practical application of monitoring screens programmed to the automation system is elucidated and conclusions from the test period are gathered up.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Pohjolan Voiman tytäryhtiölle Hämeenkyrön Voima Oy:lle, jonka voimalaitos on Metsä Board Kyron paperi- ja kartonkitehtaan yhteydessä. Hämeenkyrön Voiman osakkaina ovat Metsä Board Kyro ja Leppäkosken Sähkö.

Työn ohjaajana toimi Metsä Board Kyron voimalaitoksen käyttöpäällikkö Tero Siltanen ja työn tarkastajana toimi professori Antti Oksanen. Haluan kiittää heitä työhön liittyvässä ohjauksesta sekä kannustuksesta. Haluan kiittää myös Hämeenkyrön Voiman toimitusjohtajaa Jarmo Tervoa asiantuntevasta opastuksesta ja käytännön neuvoista. Kiitoksia Petri Niemelälle yhteistyöstä sovelluksen siirtämisessä automaatiojärjestelmään. Lisäksi haluan vielä lausua kiitokset kollegoille ja muille työn valmistumisessa auttaneille henkilöille.

Lopuksi vielä kiitokset koko perheelleni saamastani tuesta yliopistourallani!

Hämeenkyrössä, 12.8.2015

Matias Hytti

## SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO .....	1
2	HÄMEENKYRÖN VOIMA .....	2
2.1	Kattila K8 .....	4
3	HÖYRYPROSESSI .....	5
3.1	Carnot-prosessi .....	5
3.2	Clausius-Rankine – prosessi .....	6
3.3	Höyryprosessin hyötysuhteen parantaminen .....	8
3.4	Teollisuuden vastapainevoimalaitos .....	9
3.5	Leijupoltto .....	10
3.6	Kerrosleijukattila .....	12
3.7	Turbiinilaitos .....	12
3.7.1	Lauhdeturbiini .....	13
3.7.2	Vastapaineturbiini .....	13
3.8	Höyryverkko .....	13
4	VOIMALAITOKSEN KÄYTÖNAIKAISEEN OPTIMOINTIIN VAIKUTTAVAT OSATEKIJÄT .....	15
4.1	Voimalaitoksen hyötysuhde .....	15
4.2	Kattilahyötysuhde .....	16
4.2.1	Epäsuora menetelmä .....	16
4.2.2	Suora menetelmä .....	17
4.2.3	Savukaasuhäviö .....	17
4.2.4	Palamattomien häviöt .....	18
4.3	Turbiinin hyötysuhde .....	18
4.4	Apulauhde .....	19
5	KIIENTEÄN POLTTOAINEEN VAIKUTUS ENERGIA TEHOKKUUTEEN .....	20
5.1	Puupolttoaineen ominaisuudet .....	20
5.1.1	Polttoaineen lämpöarvo ja kosteus .....	21
5.1.2	Savukaasuanalyysi .....	23
6	VOIMALAITOKSEN ENERGIA TEHOKKUUS .....	27
6.1	Kokonaishyötysuhde .....	27
6.2	Kattilahyötysuhde .....	28
6.3	Omakäyttösähkö .....	29
7	KÄYTÖNAIKAISEN OPTIMOINNIN MITTARIT .....	30
7.1	Mittareiden sovitus .....	33
7.1.1	Pienimmän neliösumman menetelmä .....	34
7.1.2	Korrelaatiokerroin .....	35
8	ENERGIA TEHOKKUUDEN ONLINE-SEURANTATYÖKALUN SUUNNITTELU .....	36
8.1	Kattilahyötysuhde .....	37

8.1.1	Savukaasuhäviö .....	37
8.2	Turbiini .....	41
8.2.1	Apulauhde.....	42
8.3	Rakennusaste .....	43
8.4	Kaukolämpö .....	43
8.5	Omakäyttösähkö .....	44
8.6	Nettosähköennusteen toteutuminen .....	45
9	KÄYTÄNNÖN TOTEUTUS .....	47
9.1	Johtopäätökset .....	50
10	YHTEENVETO.....	52
	LÄHTEET .....	53

LIITE 1: LASKENTALISÄYKSET

LIITE 2: SAVUKAASUN O<sub>2</sub>-PITOISUUDEN KORJAUSKERROIN SEKÄ  
PRIMÄÄRI- JA PALAMISILMAN SUHDESÄÄTÖ

# 1 JOHDANTO

Teollisuus on lisääntynyt Suomessa huomattavasti viime vuosikymmeninä. Teknologian kehittyminen ja automaation lisääntyminen muokkaavat jatkuvasti teollisia prosesseja tehokkaammiksi. Uusiutuvien energialähteiden merkitys energiantuotannossa jatkaa kasvuaan, kun pyritään eroon öljyriippuvuudesta kohti kestävämpää kehitystä. Jatkuvas-  
ti kiristyvät päästö- ja ympäristövaatimukset sekä kasvava energiantarve tuovat uusia haasteita energiateollisuudelle. Biopolttoaineiden käyttö on lisääntynyt Suomessa merkittävästi. Kilpailun kiristyessä jatkuva kehitys säästöjen ja päästöjen suhteen on kaikil-  
le alan yrityksille arkipäivää.

Tämän diplomityön tarkoituksena on luoda Hämeenkyrön Voiman laitokselle parempia työkaluja päivittäiseen energiatehokkuuden seurantaan ja optimointiin. Voimalaitos sijaitsee Hämeenkyrössä paperi- ja kartonkitehtaan yhteydessä. Andritzin Oy:n toimit-  
tama biokattila (K8) otettiin käyttöön syksyllä 2012. Voimalaitos on CHP-laitos eli yh-  
distetty lämmön- ja sähköntuotantolaitos. Voimalaitoksen ensisijaisena tehtävänä on  
tuottaa prosessihöyryä paperi- ja kartonkikoneille sekä lämpöä Hämeenkyrön kunnan  
kaukolämpöverkkoon. Lisäksi voimalaitoksella tuotetaan sähköä, joka myydään valta-  
kunnalliseen verkkoon. Voimalaitoksen sähköteho on 12 MW, lämpöteho 55 MW ja  
polttoainetehtä 88 MW.

Suurin osa Suomen päästöistä aiheutuu energian tuotannosta ja käytöstä. Energian sääs-  
täminen ja sen käytön tehostaminen ovat merkittävässä osassa Suomen energiapolitiik-  
kaa. Energiatehokkuustoimintasuunnitelmat ohjaavat teollisuuden energiatehokkuutta ja  
energiansäästöä. Tämä työ on toteutettu osana Hämeenkyrön Voiman siirtymistä käyt-  
tämään energiatehokkuusjärjestelmää ETJ<sup>+</sup> sekä ISO 50001 –standardia.

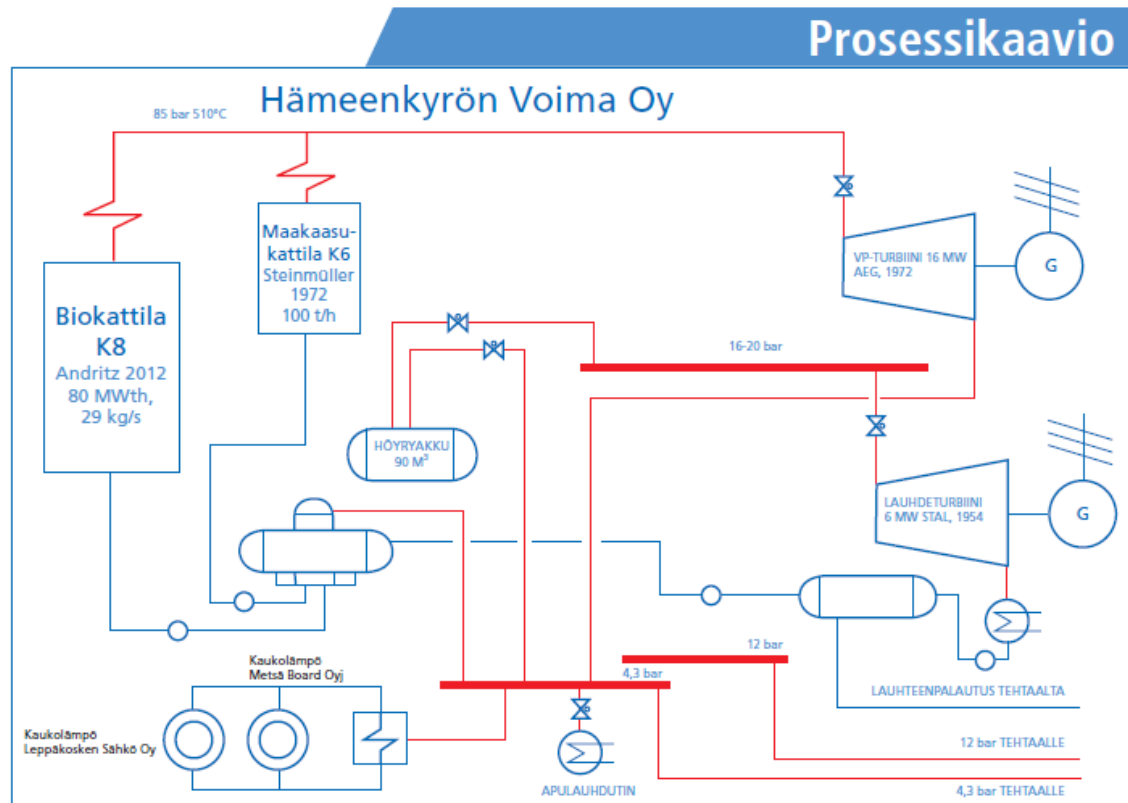
## 2 HÄMEENKYRÖN VOIMA

Biovoimalaitos valmistui Kyröskoskelle syksyllä 2012 Pohjolan Voiman, Leppäkosken Sähkön ja Metsä Boardin yhteishankkeena. Hankkeeseen kuuluivat uusi kattilalaitos (K8) sekä polttoaineen vastaanotto- ja käsittelyjärjestelmät. Voimalaitoksen sähköteho on 12 MW ja lämpöteho 55 MW. Uuden kattilalaitoksen rakentamisessa käytettiin hyväksi mahdollisimman paljon jo olemassa olevaa laitteistoa. Biovoimalaitoksella on käytössä on Metso DNA –voimalaitosautomaatiojärjestelmä, johon sisältyy myös turva-automaatio, kenttäsuunnittelu sekä informaatio- ja raportointisovellukset. [2; 4]

Hämeenkyrön tehdas Kyro Oyj perustettiin Kyröskosken taajamaan vuonna 1870. Metsä-Serla, nykyinen Metsä Board, osti metsäteollisuuden toiminnot itselleen vuonna 1995. Metsä Board on osa Metsä Group -konsernia, johon kuuluvat lisäksi Metsä Wood, Metsä Tissue, Metsä Fibre ja Metsäliitto Puunhankinta. Paperinvalmistus alkoi tehtaalla vuonna 1878, ja ensimmäinen kartonkikone ostettiin vuonna 1936. Tällä hetkellä tehdasalueella on käytössä yksi paperi- ja yksi kartonkikone. Paperi- ja kartonkikoneet on toimittanut Valmet ja Tampella. [1]

Voimalaitoksen tarkoituksena on tuottaa prosessihöyryä ja sähköä tehtaan tarpeisiin. Osa voimalaitoksen tuottamasta sähköstä myydään valtakunnan verkkoon. Lisäksi voimalaitoksella tehdään kaukolämpöä Leppäkosken Sähkön asiakkaille. Voimalaitoksella on kolme kattilaa, joista käytössä ovat K6 ja K8. Kattila 6 on entinen pääkattila, joka toimii tällä hetkellä varakattilana. Polttoaineena kattila käyttää maakaasua ja öljyä. K7 on maakaasua käyttävä kombivoimalaitos, eli siinä on maakaasuturbiini, joka on yhdistetty perinteiseen höyryprosessiin. Kattila 7 ei ole käytössä, mutta Metsä Boardin omistuksessa oleva kaasuturbiini tulee toimimaan valtakunnan verkon häiriöreservissä. Kuvassa 2.1 on esitetty yksinkertaistettu prosessikaavio Hämeenkyrön Voima Oy:sta. [1]





**Kuva 2.1:** Hämeenkyrön Voiman prosessikaavio. [2]

Voimalaitoksella on käytössä turbiini G4, jolla tuotetaan prosessihöyryä paperi- ja kartonkikoneelle 4,7 bar paineessa. Välioton paine on 18 bar, joka kuitenkin lasketaan reduktion avulla 12 bar:n ennen tehtaalle menoa. Samalla generaattori muuttaa turbiinin liike-energian sähköksi. Turbiinin nimellisteho on 16 MW ja tuorehöyryn arvot ovat 84 bar ja 510 °C. Tarkemmat tiedot turbiinista ovat esitelty taulukossa 2.2.

**Taulukko 2.2:** Turbiinin G4 tunnusluvut.

Valmistaja	AEG Kanis
Valmistusvuosi	1972
Tyyppi	Vastapaineturbiini
Tuorehöyryn paine	84 bar
Tuorehöyryn lämpötila	510 °C
Teho	16 MW
Väliotto	12 bar
Vastapaine	4,9 bar

Voimalaitoksella on myös käytössä höyryakku vastapaineen ylläpitämiseksi kuorman vaihteluissa, kuten prosessikaaviosta ilmenee. Tarvittaessa voidaan 6 MW lauhdeturbiini ottaa käyttöön. Tosin se vaatii hieman alkuvalmisteluja ja koeajoja, sillä se ei ole ollut käytössä pitkään aikaan.

## 2.1 Kattila K8

Kattila K8 käyttää pääasiallisena polttoaineena kiinteitä biopolttoaineita ja turvetta. Käynnistykseen käytetään maakaasua tai öljyä, jotka toimivat myös varapolttoaineena. Lisäksi voimalaitoksessa poltetaan tehtaan jätevedenpuhdistamolla syntyvää lietettä. K8 on leijukerroskattila, jonka polttoaineteho on 88 MW. Tuorehöyryn paine on 84 bar ja lämpötila 510 °C. Tarkemmat tiedot kattilasta löytyvät taulukosta 2.1. [2]

**Taulukko 2.1:** Kattilan K8 tunnusluvut.

Valmistaja	Andritz Oy
Valmistusvuosi	2012
Tyyppi	Leijukerros
Tuorehöyryn paine	84 bar
Tuorehöyryn lämpötila	510 °C
Polttoaineteho	80 MW
Höyryn virtaus	29 kg/s

Kattila on Andritz Oy:n toimittama luonnonkiertokattila, jossa käytetään kerrosleijua. Palamisilma otetaan kattilahuoneen yläosasta tai ulkoilmasta riippuen lämpötilasta ja primääri-ilma kattilahuoneen sisältä. Primääri- ja palamisilma lämmitetään savukaasuluvoilla ennen kattilaan johtamista. Lentotuhkaa kerätään kakkos- ja kolmosvedoissa suppiloihin, joista ne siirretään pneumaattisilla lentotuhkakuljettimilla tuhksiiloon. Kattilan jälkeen savukaasukanavassa on letkusuodattimet, joilla poistetaan loputkin kiintoainepartikkelit savukaasuista. [19, s. 3]

Tulipesän pohjalla on tatin muotoisia ilmasuuttimia petimateriaalin leijutusta varten. Leijukerros on kupliva, jossa petimateriaali pysyy pedissä, eikä lähde savukaasun mukana kiertoön. Polttoaineen mukana tulevat kivet ja muut epäpuhtaudet sekä leijukerrokseen kertynyt karkea petimateriaali painuvat raskaampina pedin läpi arinan pohjalle suppiloihin. Pohjatuhka poistetaan vesijäähdytetyillä pohjatuhkaruuveilla kuljettimille, joilla se kerätään pohjatuhkakontteihin. [19, s. 3]

Kattilassa on kaksi kuormapoltinta ja kaksi käynnistyspoltinta, joita käytetään kattilan ylösajoon sekä kiinteän polttoaineen syötön ongelmatilanteissa. Polttoaineena polttimisessa käytetään kevyttä polttoöljyä tai maakaasua. Kaikki polttimet sijaitsevat kattilan takaseinällä eli kiinteän polttoaineen syöttöön nähden vastakkaisella puolella. Biopolttoaineella on kaksi isompaa varastosiiloa, joista polttoaine ohjataan kuljettimilla kattilan seinustalla sijaitsevaan tuntisiiloon. Kiinteän polttoaineen syöttöä varten on ruuvipurkain tuntisiilon pohjalla, kolakuljetin siilolta kattilalle, tasaustasku, kaksi rinnakkaista ruuvipurkainta ja kaksi sulkusyötintä ennen kattilan tulipesää. [19, s. 3]

## 3 HÖYRYPROSESSI

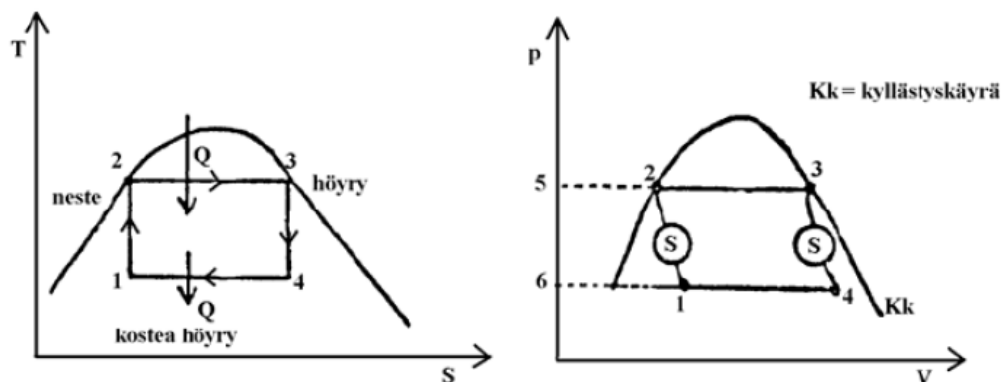
Höyryprosessilla tarkoitetaan kiertoprosessia, jossa energian muunnetaan muodosta toiseen. Höyryvoimalaitosten kiertoprosessit ovat suljettuja prosesseja. Tässä tapauksessa polttoaineen kemiallinen energia muunnetaan polttamalla lämpöenergiaksi ja siitä edelleen prosessihöyryksi sekä sähköksi. Väliaineena käytetään poikkeuksetta vettä, joka faasimuutoksen kautta esiintyy osassa prosessista vetenä ja osassa höyrynä. Höyryn hyvien lämmönsiirto-ominaisuuksien avulla on helppo siirtää suuria lämpötehoja ja lämmitteä kohteita suoraan. [5, s. 9; 9, s. 54]

### 3.1 Carnot-prosessi

Carnot-prosessi on yksinkertaisin palautuva kiertoprosessi. Prosessi on isoterminen eli lämmöntuonti systeemiin sekä lämmön poistaminen systeemistä tapahtuu vakioämpötiloissa  $T_{\max}$  ja  $T_{\min}$ . Höyryprosesseissa käytetään hyväksi väliaineen höyrystymistä ja lauhdumista, jotka vakioaineessa suoritettuina tapahtuvat vakioämpötilassa. Carnot-prosessin hyötysuhde  $\eta$  voidaan laskea yhtälöllä

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}}, \quad (3.1)$$

missä  $W$  on prosessiin viedystä lämmöstä saatava työ,  $Q_H$  on prosessiin tuotu lämpö,  $Q_L$  on prosessista poistuva lämpö,  $T_{\min}$  on prosessin lämmönpoiston minimilämpötila ja  $T_{\max}$  on prosessin lämmöntuonin maksimilämpötila. Kuvassa 3.1 on esitetty Carnot-prosessi höyrylle TS- ja pV-tasoissa. [9, s. 55–64]

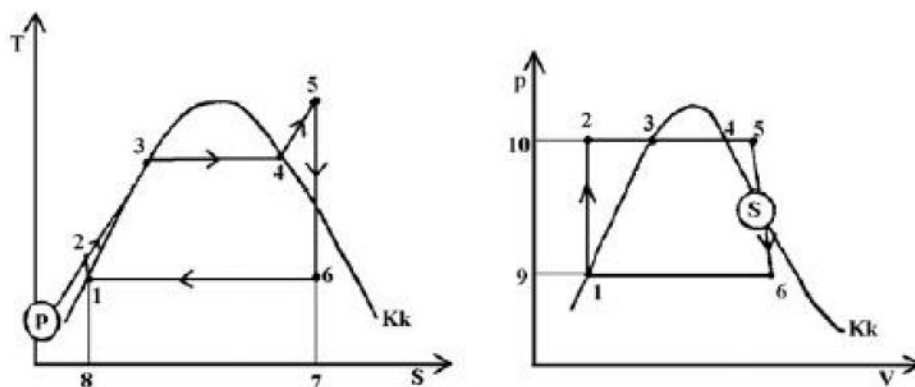


**Kuva 3.1:** Carnot-prosessi TS- ja pV-tasoissa. [9, s. 64]

Käytännössä tämän prosessin toteuttamiseksi järkevästi tarvittaisiin erittäin suuret koneet, koska puristustyö 1256 on niin suuri turbiinin tekemään työhön 3456 verrattuna. Tehosuhteeseen alentavasti vaikuttavat myös puristuksessa ja paisunnassa tapahtuvat häviöt. Neste-höyry –seoksen puristaminen isentrooppisesti tuottaa ongelmia, sillä ainoastaan höyry pyrkii kuumenemaan ja lämmön tulisi siirtyä nestefaasiin riittävän nopeasti. [9, s. 64]

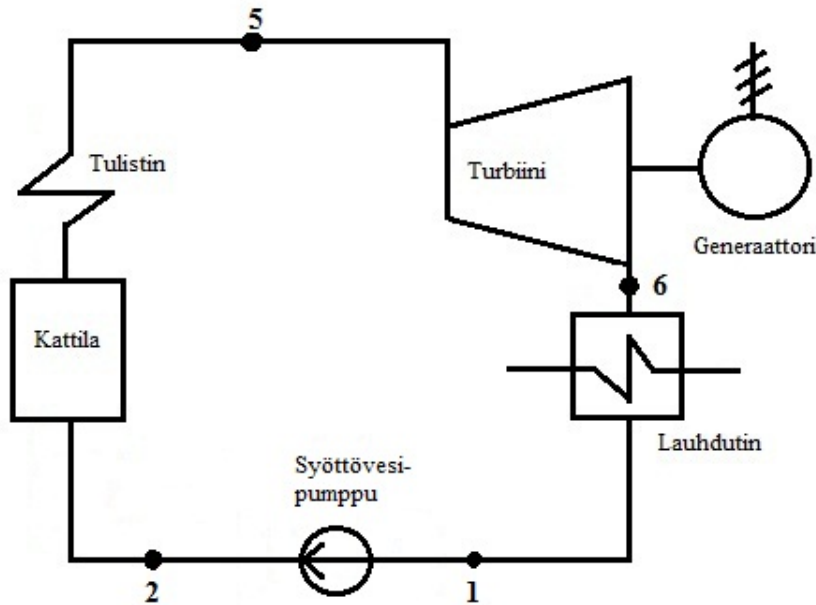
### 3.2 Clausius-Rankine – prosessi

Todellisuudessa höyryvoimalaitosprosesseissa käytetään yleisesti Clausius-Rankine – prosessin periaatetta. Tässä prosessissa höyryn tulistaminen kattilassa ja lauhduttaminen kokonaan nesteeksi lauhduttimessa antaa ratkaisun moniin Carnot-prosessissa esiintyviin käytännön ongelmiin. Kylläinen neste lämmitetään höyrystyslämpötilaan lämmöntuontiprosessin aikana, mikä laskee lämmöntuonnin keskilämpötilaa ja huonontaa hyötysuhdetta Carnot-prosessiin verrattuna. Kuvassa 3.3 on esitetty Clausius-Rankine – prosessi TS- ja pV-tasoissa. [17; 5 s. 10–13]



**Kuva 3.2:** Clausius-Rankine -prosessi TS- ja pV-tasoissa. [9, s. 65]

Vaiheessa 1–2 nesteen paine nostetaan syöttövesipumpulla höyrystyslämpötilaa  $T_3$  vastaavaan kyllästysarvoon. Vaiheessa 2–3 neste kuumennetaan kattilassa höyrystyslämpötilaan paineen pysyessä vakiona, ja höyrystyminen kattilassa on kuvattu vaiheessa 3–4. Höyryn tulistaminen tapahtuu vaiheessa 4–5, jonka jälkeen tulistettu höyry ohjataan turbiiniin. Turbiinissa tulistettu höyry paisuu isentrooppisesti lämmön muuttuessa työksi generaattorin välityksellä, mikä on kuvattu vaiheessa 5–6. Höyryn paine ja lämpötila laskevat, jonka jälkeen vaiheessa 6–1 höyry lauhtuu lauhduttimessa kylmäiseksi vedeksi. Lauhdutin toimii suurena lämmönsiirtimenä, jossa vapautuva lämpö siirretään esimerkiksi järvi- tai meriveteen. Kuvassa 3.2 on esitetty tulistimella varustetun kylmäisellä höyryllä toimivan höyryvoimalaitoksen Clausius-Rankine – prosessin prosessikaavio. [17; 9 s. 65]



**Kuva 3.3:** Clausius-Rankine –prosessin prosessikaavio.

Clausius-Rankine –prosessin koostuu monista pienemmistä osaprosesseista. Paisuntatyötä kuvaa entalpioiden erotus  $h_5-h_6$  pisteissä 5 ja 6 pV-piirroksessa. Nesteen puristustyötä kuvaa entalpioiden erotus  $h_2-h_1$  pisteissä 2 ja 1 pV-piirroksessa. Nettotyö saadaan vähentämällä paisuntatyöstä nesteen puristamiseen käytetty työ. Tuotu lämpö  $Q_1$  saadaan integroimalla lämpötila  $T$  pisteiden 2 ja 5 välillä

$$Q_1 = \int_2^5 T ds = \bar{T}(s_5 - s_2) = h_5 - h_2 . \quad (3.2)$$

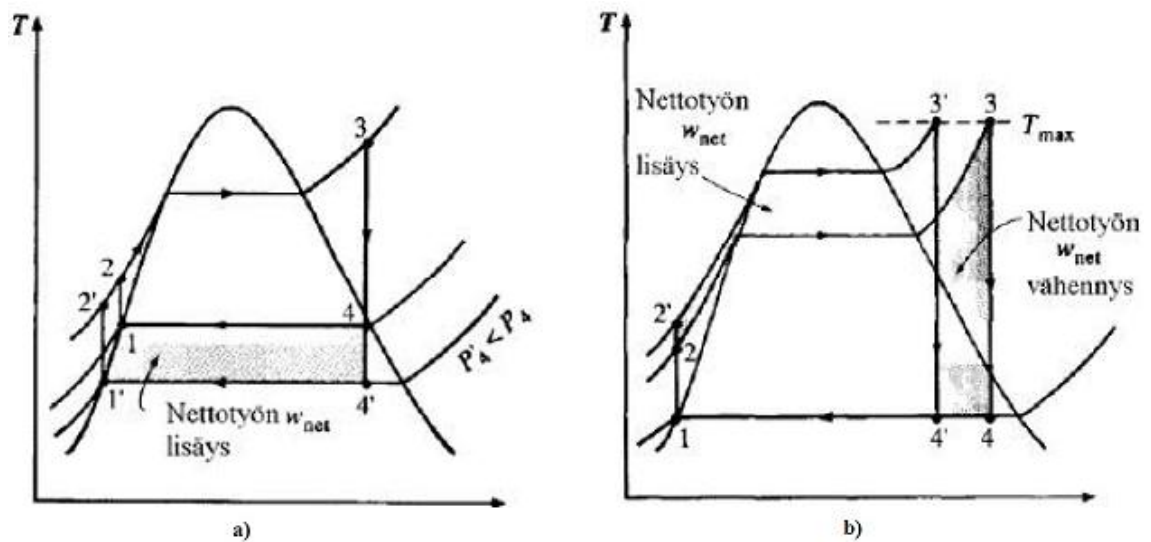
Poistettu lämpö saadaan laskettua lauhduttimessa tapahtuvassa lämmönsiirrosta entalpioiden erotuksena  $h_6-h_1$  pisteissä 6 ja 1. Näiden osaprosessien avulla muodostetaan yhtälöt Clausius-Rankine –prosessin hyötysuhteen laskemiseksi [9, s.65–66; 18, s. 316]

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{(h_5 - h_6) - (h_2 - h_1)}{h_5 - h_2} = \frac{\bar{T}(s_5 - s_2) - T_1(s_6 - s_1)}{\bar{T}(s_5 - s_2)} = 1 - \frac{T_1}{\bar{T}} . \quad (3.3)$$

Hyötysuhdetta alentaa vaiheen 2 huono hyötysuhde, jolloin lämmöntuonnin keskilämpötila laskee, kun verrataan Carnot-prosessiin. Toisaalta, tulistusvaihe 4-5 nostaa hyötysuhdetta. Tulistus kasvattaa lisäksi höyrypitoisuutta paisunnan loppupisteessä, jolloin turbiinin siivet pysyvät paremmassa kunnossa. Höyryn kosteus ei saa ylittää 12 %, sillä nestepisarat aiheuttavat turbiinin siipien kulumista ja huonontavat turbiinin mekaanista hyötysuhdetta. [9, s. 66; 17]

### 3.3 Höyryprosessin hyötysuhteen parantaminen

Höyryvoimalaitoksen hyötysuhdetta parannetaan yleisesti joko lisäämällä kattilaan tuodun lämmön keskilämpötilaa tai laskemalla lauhduttimesta poistuvan lämmön keskilämpötilaa. Hyötysuhteen kasvattaminen tuottaa suuria säästöjä polttoaineen kulutuksessa. Kuvassa 3.4 on esitetty lauhduttimen paineen laskemisen ja kattilan paineen nostamisen vaikutukset hyötysuhteeseen.



**Kuva 3.4:** Hyötysuhteen parantaminen a) lauhduttimen painetta laskemalla ja b) kattilan painetta nostamalla. [9, s. 72]

Kylläinen höyry on lauhduttimen painetta vastaavassa kyllästymislämpötilassa, minkä vuoksi lauhduttimen paineen alentaminen laskee höyryn lämpötilaa ja samalla poistuvan lämmön lämpötilaa. Lauhduttimen painetta ei voi laskea alle jäähdytysaineen lämpötilaa vastaavaa kyllästymispainetta. Paineen alentaminen lauhduttimessa lisää höyryn kosteuspitoisuutta, joka aiheuttaa turbiinin siivistön kulumista. Kuvasta 3.4 b) nähdään, miten kattilan paineen kasvattaminen nostaa höyrystymislämpötilaa, ja parantaa prosessin hyötysuhdetta. Samalla höyryn kosteuspitoisuus kasvaa, jota voidaan pienentää höyryn välitulistuksen avulla. [9, s. 72; 17]

Höyryn tulistaminen korkeampaan lämpötilaan nostaa lämmöntuonnin keskilämpötilaa, parantaa hyötysuhdetta sekä vähentää lauhduttimeen menevän höyryn kosteuspitoisuutta. Höyryn tulistamista rajoittavat käytettyjen materiaalien ominaisuudet siten, että nykypäivänä korkein mahdollinen tuorehöyryn lämpötila on 620 °C. Keraameja on pidetty yhtenä mahdollisuutena korkeampien tuorehöyryn lämpötilojen saavuttamiseksi. [9, s. 72–73; 17]

Höyryn välitulistusta käytetään, jos yksi tulistus johtaisi liian korkeaan lämpötilaan tai paisunnan loppupiste jäisi liian kostean höyryn alueelle. Välitulistuksessa höyryn anne-

taan ensin paisua korkeapaineturbiinissa välipaineeseen, jonka jälkeen höyry ohjataan uudelleen kattilaan, jossa se lämmitetään vakioaineessa. Tämän jälkeen höyry johdetaan matalapaineturbiiniin, jossa sen annetaan paisua lauhduttimen paineeseen. Yleensä voimalaitoksissa käytetään yhtä välitulistusta, ja vain ylikriittisissä voimalaitosprosesseissa käytetään kahta välitulistusta. [9, s. 72–73; 17]

Syöttöveden esilämmitys toteutetaan yleisesti regeneraatiolla eli siirtämällä osa paisuvan höyryn lämmöstä syöttöveteen. Lämmöntuonnin keskilämpötila nousee ja samalla hyötysuhde paranee. Syöttöveden esilämmitys väliottohöyryllä aiheuttaa tehon pienemisen, sillä turbiinin läpi kulkevan höyryn määrä vähenee. Lisäksi esilämmityksessä syöttövedestä poistuu hapetta, jolloin kattilassa ei tapahdu korroosiota niin herkästi. Syöttöveden esilämmitystä on ollut käytössä moderneissa voimalaitoksissa 1920-luvulta lähtien. [9, s. 73; 17]

### 3.4 Teollisuuden vastapainevoimalaitos

Teollisuudessa prosesseihin käytetään höyryä tietyssä paineessa ja lämpötilassa, mikä määrittelee hyvin pitkälti voimalaitoksen ajomallin. Teollisuuden vastapainevoimalaitokset ovat yhdistettyjä lämmön- ja sähköntuotantolaitoksia eli CHP-laitoksia (Combined Heat and Power). Lämmitystehon tarpeen ollessa riittävän suuri, noin 10 MW, ja laitoksen ollessa käytössä jatkuvasti ympäri vuoden lukuun ottamatta lyhyitä huoltoseisokkeja, on kannattavaa tuottaa myös sähköä. Vastapainevoimalaitoksissa kokonaishyötysuhde on jopa yli 90 %, sillä niissä hyödynnetään valtaosa siitä lämmöstä, joka lauhdevoimalaitoksissa menee jäähdytysveden mukana ympäristöön. Vastapainevoimalaitoksen sähköntuotanto on huomattavasti pienempi kuin samoilla tuorehöyryn arvoilla toimivan lauhdevoimalaitoksen, sillä teollisuuden prosesseissa käytettävän lämmityshöyryn korkeampi paine ja lämpötila pienentävät turbiinin sähkötehoa. Teollisuuden voimalaitoksissa höyryntuotannon vuotuiset vaihtelut ovat melko vähäisiä, sillä primäärihöyryn tarve pysyy samana ympäri vuoden. Kaukolämmön kysyntä kasvaa talvisin, jolloin myös kokonaishöyryntuotanto on suurempi. [9, s. 100; 22 s. 63–65]

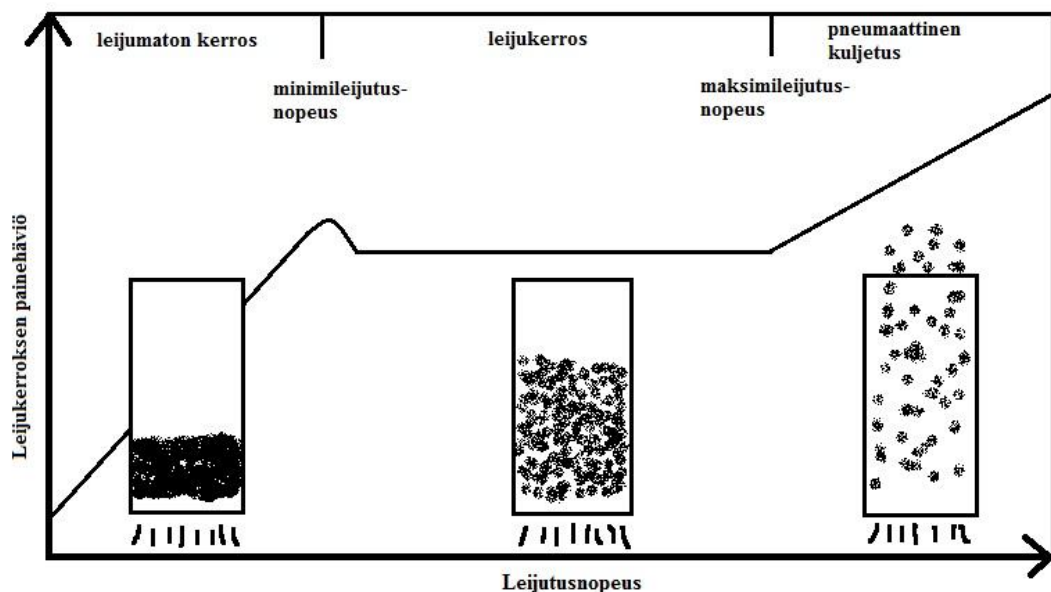
Teollisuusprosesseissa tarvitaan usein lämmityshöyryä eri paineissa, jota saadaan turbiinin väliotoista. Teollisuuden voimalaitoksille on tyypillistä käyttää kylläistä höyryä, jolloin lauhtuva höyry lämmittää prosessia tehokkaasti. Höyryä voidaan käyttää myös kohteiden suoraan lämmitykseen. Tällöin merkittävä osa prosessin lämmityshöyrystä eivät palaa takasin voimalaitokselle, jolloin lisäveden ja veden käsittelyn tarve on suuri. Lauhteen puhtautta seurataan jatkuvasti, jotta epäpuhtaudet eivät pääse aiheuttamaan korroosiota. [9, s. 100; 22 s. 63–65]

### 3.5 Leijupoltto

Polttotapana leijutekniikka soveltuu parhaiten vaihtelevalaatuiselle matalan lämpöarvon omaavalle kiinteälle polttoaineelle, jonka polttaminen muilla tekniikoilla vaatisi erikoisjärjestelyjä. Leijupoltto on yksi tärkeimmistä keinoista polttaa kiinteitä aineita ympäristöystävällisesti, ja Suomi on ollut edelläkävijä leijutekniikan polttoprojektien kehittäjänä. Kaupalliselle asteelle polttoprojektit saatiin kehitettyä 1970-luvulla. [5, s. 92]

Palamaton ja jauhemainen materiaali muodostaa kerroksen, jota leijutetaan arinan pohjalla olevien ilmasuuttimien kautta sopivalla nopeudella johdetun ilman avulla. Turvetta ja muita puuperäisiä kiinteitä polttoaineita poltettaessa leijukerrosmateriaalina käytetään usein hiekkaa. Leijukerros-poltossa polttoaine palaa tämän kerroksen sisällä. [5, s. 92]

Leijukerroksen painehäviön suuruudesta voidaan päätellä sopiva leijutusnopeus kuvan 3.5 mukaisesti. Alussa painehäviö kasvaa lineaarisesti, kunnes saavutetaan minileijutusnopeus ja petimateriaali alkaa leijua arinan pohjalta johdetun kaasun avulla. Painehäviö kerroksessa pysyy vakiona leijutusnopeusalueella, ja kaasun voidaan vaikuttaa ainoastaan palamisominaisuuksiin. Painehäviö alkaa kasvaa maksimileijutusnopeuden ylityttyä, jolloin petimateriaali leviää myös kattilan yläosiin sekä savukaasukanavaan. [5, s. 92–93]



*Kuva 3.5: Leijukerroksen painehäviön riippuvuus leijutusnopeudesta.*



Leijukerroksen painehäviö  $\Delta p$  voidaan laskea hydrostaattisen paineen yhtälöstä

$$\Delta p = \rho gh, \quad (3.4)$$

missä  $\rho$  on leijukerroksen tiheys,  $g$  on putoamiskiihtyvyys ja  $h$  on leijukerroksen korkeus. Likiarvo leijukerroksen painehäviölle voidaan laskea jakamalla leijukerroksen painoarina pinta-alalla. [5, s. 93]

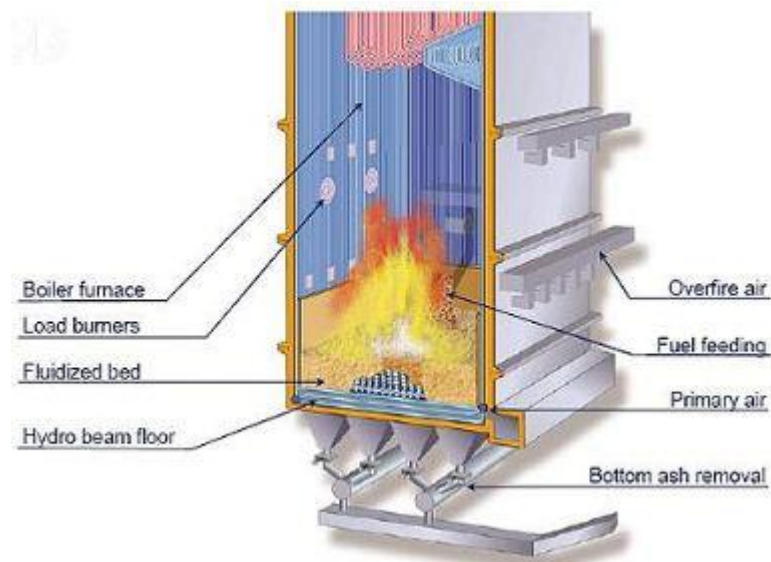
Leijukerroksen lämpötila vaihtelee välillä 750–950 °C, ja palamislämpötila pidetään tuhkan sulamispisteen alapuolella. Sopivaa petilämpötilaa pidetään yllä joko jäähdytetävällä lämmönsiirtoputkistolla tai kierrättämällä savukaasuja arinaan palamisilman mukana. Kevyempi polttoaine nousee ilman mukana leijupedin yläpuolelle, jota kutsutaan jälkipalotilaksi. Pohjatuhka eli painavampi tuhka ja isommat kivet painuvat pedin läpi ja poistetaan arinan pohjalta. Osa tuhkasta, eli lentotuhka, poistuu savukaasujen mukana, jotka puhdistetaan useimmiten letku- tai sähkösuodattimilla. [5, s. 93]

Leijukerros poltolla on monia etuja muihin polttotapoihin verrattuna. Mahdollisuus monipolttoainekäyttöön sekä heikkolaatuisten polttoaineiden polttamiseen ilman esikäsitteilyä. Palamisen hyötysuhde on kuitenkin korkea, yli 99 %, eikä siltikään tarvita tukipolttoa. Typen oksidi-, eli  $\text{NO}_x$ -päästöt, ovat pienet alhaisen palamislämpötilan vuoksi ja rikin talteenotto on halpa ja helppo järjestää. Lämmönsiirtyminen on tehokasta, leijukerrosessa  $\alpha = 200\text{--}500 \text{ W/Km}^2$ , joten kattilan koko pienenee ja lämpöpintoja tarvitaan vähän. Leijupolton ongelmia ovat suuri omakäyttöteho, osakuormilla ajo on hankalaa, ongelmat polttoaineen syötössä laadun vaihteluista johtuen ja kattilan säätöjärjestelmän luotettavuus. Leijukerros ei saa sintraantua eli sulaa kakuksi missään olosuhteissa. [5, s. 94]

Leijupolton toteutusmahdollisuuksia ovat joko kupliva leijukerros, eli kerrosleiju, tai kiertävä leijukerros, eli kiertoleiju. Pedin käyttäytymiseen vaikuttavat petimateriaali, pedin korkeus, ilman virtausnopeus sekä ilman vaiheistus. Samoilla ominaisuuksilla, erityisesti ilmasäädöillä, ohjataan palamista kattilassa. Kerrosleijussa primääri-ilman nopeus on 1,0–3,0 m/s ja pedin korkeus 0,5–1,0 m. Polttoilmasta noin puolet tuodaan primääri-ilmana arinan pohjalta. Loput tuodaan pedin yläpuolelle jälkipalotilaan, jolloin ilman vaiheistuksella voidaan vähentää  $\text{NO}_x$ -päästöjä. Kiertoleijussa petimateriaalin hiukkaskoko on yleensä hieman pienempi ja kaasunnopeus petiin on 4–10 m/s. Suuri osa hiukkasista kulkeutuu savukaasujen mukana pois pedistä, jonka jälkeen ne erotetaan sykloneilla ja palautetaan takaisin pedin alaosaan. [5, s. 95]

### 3.6 Kerrosleijukattila

Petimateriaalina käytetään hiekkaa tai kalkkikiveä, jonka raekoko on luokkaa 1 mm. Kuplivassa leijupoltossa normaalissa paineessa biopolttoaineilla voidaan saavuttaa  $3 \text{ MW/m}^2$  polttoaineteho reaktorin poikkipinta-alaa kohti. Kerrosleijukattila on suhteellisen halpa sen yksinkertaisesta rakenteesta johtuen. Kuvassa 3.6 on esitetty leijukerroskattilan poikkileikkaus. [21]



**Kuva 3.6:** Poikkileikkaus kerrosleijukattilasta. [20]

Lämmön siirtyminen leijupedissä tapahtuu hiukkasten ja kaasun konvektion välityksellä ja pieni osa lämmöstä siirtyy säteilemällä. Lämpötilat määräävät leijupolton säteilylämmönsiirtokertoimen  $\alpha_r$  olevan luokkaa  $50\text{--}120 \text{ W/Km}^2$ . Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin riippuu leijukerroksen hiukkasten koosta. Kokonaislämmönsiirtokertoimeen vaikuttaa lisäksi tulipesän lämpöpintojen geometria, ja se on yleensä  $250\text{--}280 \text{ W/Km}^2$ . [21]

### 3.7 Turbiinilaitos

Höyryvoimalaitoksissa lämpöenergia muunnetaan mekaaniseksi energiaksi höyryturbiineilla. Korkeapainehöyryn sisältämä energia pyörittää turbiinin akselia, ja akseliin yhdistetyllä generaattorilla pyörimisenergia muunnetaan sähköenergiaksi. Energian siirto tapahtuu ohjaamalla höyry turbiinin johto- ja juoksusiivistöjen läpi. Turbiinin runkoon kiinnitetyt johtosiivet muodostavat staattorin. Siivet pysyvät paikoillaan muuttaen virtauksen suuntaa. Turbiinissa paisuva höyry pyörittää akseliin kiinnitettyjä juoksusiipiä eli roottoria, jolloin virtauksesta saadaan työtä. Johto- ja juoksusiipien poikkileikkaukset sopivat siipiprofiiliin ja ovat toiselta puolelta koveria. Turbiini koostuu useista peräkkäisistä johto- ja juoksusiivistöistä. Johtopyörä- ja juoksupyöräkehä muodostavat yhdessä turbiinin vyöhykkeen eli vaiheen. [7, s. 10; 9, s. 164]

Turbiinit voidaan jakaa rakenteen perusteella aksiaali- ja radiaaliturbiineihin. Aksiaali-turbiinissa höyry virtaa turbiinin läpi akselin suuntaisesti, kun taas radiaaliturbiinissa höyry virtaa kohtisuorasti akselia vastaan. Radiaaliturbiinit ovat melko harvinaisia. Lisäksi siivistönsä perusteella turbiinit voidaan jakaa aktio- ja reaktioturbiineihin. Aktioturbiineissa höyryn virratessa juoksupyörän läpi, se vaihtaa suuntaa paineen pysyessä ennallaan. Juoksupyörän molemmiin puoliin vallitsee sama paine, eikä synny vuotohäviöitä. Höyryn paine ja lämpötila laskevat johtopyörässä, jossa ne muuttuvat virtausnopeudeksi. Reaktioturbiinissa on sama lämpötilan ja paineen lasku sekä staattorissa että roottorissa. Siinä on tällöin myös suuremmat vuotohäviöt, joiden merkitys pienenee koon ja massavirran kasvaessa. Käytännössä turbiineilla on sekä aktio- että reaktioturbiinin piirteitä. [9, s. 164–166]

### 3.7.1 Lauhdeturbiini

Lauhdeturbiineja käytetään ainoastaan sähköntuottamiseen, kun ei ole tarvetta lämmön-tuotannolle. Tuorehöyryn annetaan paisua lauhduttimen paineeseen, joka on tavallisesti välillä 2–6 kPa. Turbiineissa on yleensä useita väliottoja, joita käytetään syöttöveden esilämmitykseen sekä lämmitystä vaativiin omakäyttökohteisiin. Lauhdevoimalaitosten hyötysuhdetta voidaan parantaa nostamalla tuorehöyryn painetta, laskemalla lauhduttimen painetta, välitulistuksella ja syöttöveden esilämmityksellä väliottohöyryllä. Höyry lauhtuu lauhduttimessa vedeksi jäähdytysveden avulla, jonka jälkeen lauhtunut vesi johdetaan takaisin kattilaan. Jäähdytysveden mukana poistuu noin 60 % turbiiniin tuodusta lämmöstä. [9, s. 96–98]

### 3.7.2 Vastapaineturbiini

Vastapaineturbiinissa höyryn ei anneta lauhtua loppuun asti, vaan se poistuu ylipaineisena. Lämmitettävien kohteiden tarpeet määrittelevät väliotto- ja vastapainehöyryn paineet. Vastapaineturbiineilla tuotetaan sekä lämpöä että sähköä. Turbiinin isentrooppisen hyötysuhde on korkea ja vaihtelee yleensä välillä 85–92 % [5, s.27]. Tavanomaisia käyttökohteita ovat paperi- ja kemianteollisuus, joissa tarvitaan sähköenergiaa sekä matalapaineista prosessihöyryä. Vastapaineturbiineita käytetään myös kaukolämpövoimalaitoksissa sekä vanhemmissa voimalaitoksissa, joissa niitä käytetään esiturbiineina vanhoille lauhdeturbiineille alentamaan höyryn arvoja uuden kattilan myötä. [9, s. 100]

## 3.8 Höyryverkko

Höyrykuormien vaihtelut aiheuttavat erityisvaatimuksia höyryverkon käytettävyydelle ja kunnossapidolle. CHP-laitoksilla hyödynnetään höyryn varastointikykyä höyryn kulutuksen piikkien kattamiseen. Prosessihöyryn tarpeen nopeaan vähenemiseen on varauduttu usein sijoittamalla höyryverkkoon apulauhdutin. Muita höyrykuormien tasaa-

miseen käytettäviä komponentteja ja menetelmiä ovat höyryakku, syöttövesisäiliö sekä jatkuva ulospuhallus. [39]

Höyryakkua käytetään kuormantasaukseen, kun turbiinin automaatio ei ehdi ylläpitämään vastapainetta kuorman muutoksissa. Höyryakku kytketään usein välipaine- ja matalapaineverkon väliin. Höyryakku on noin puolillaan kylläistä vettä, ja se ladataan joltamalla siihen höyryä turbiinin väliotosta. Höyryakusta puretaan avaamalla purkausventtiili, jolloin akun paine laskee ja kylläinen vesi sitoo itseensä energiaa höyrystyessään. Höyryn purkaminen loppuu, kun vastapaine saavuttaa asetusarvonsa. Lataushöyry ei pääse paisumaan turbiinissa vastapaineeseen asti, joten siitä aiheutuu hieman hukkaa sähköenergian määrään. [39]

Apulauhdutinta käytetään kuormantasaukseen, kun vastapaine nousee liian korkeaksi, jolloin osa höyrystä lauhdutetaan järvivedellä apulauhduttimessa. Lisäksi apulauhdutinta voidaan käyttää, kun halutaan tuottaa enemmän sähköä. Sähkön markkinahinta määrittelee onko sähkön tuottaminen järkevämpää kuin lämmön. Näin tuotettua lisäsähköä kutsutaan vastapainevoiman priimasähköksi. Tällainen käytäntö on kuitenkin harvoin tarpeellinen tämän hetkisinä sähkön hinnoilla. [39]

Syöttöveden esilämmityksellä voidaan parantaa voimalaitoksen hyötysuhdetta. Syöttöveden esilämmittimet jaetaan matalapaine-esilämmittimiin, syöttövesisäiliöön ja korkeapaine-esilämmittimiin. Esilämmittimiä lämmitetään turbiinin väliottohöyryllä. Syöttöveden esilämmitys parantaa sähköntuotannon hyötysuhdetta, sillä väliottohöyry on paisuessaan lisännyt sähköntuotantoa, ja nyt sen lämpö käytetään vielä hyväksi voimalaitosprosessin sisällä. Prosessihöyryn lämpöenergiasta vain pieni osa palautuu lauhteena takaisin voimalaitokselle. [22, s. 48]

## 4 VOIMALAITOKSEN KÄYTÖNAIKAISEEN OPTIMOINTIIN VAIKUTTAVAT OSATEKIJÄT

Voimalaitoksen automaatiojärjestelmän tarkoituksena on toteuttaa energian tuotannossa tarvittavat tehon muutokset mahdollisimman nopeasti, tarkasti ja pienin häviöin. Höyrykattilan säädöillä pyritään tuottamaan kattilassa höyryä tietyssä paineessa ja lämpötilassa turvallisesti sekä taloudellisesti. CHP-laitoksissa höyrykattilan lisäksi toinen keskeinen säädettävä toimilaite on höyryturbiini. [5, s. 157]

Turbiini toimii pääasiallisena säätäjänä painesäädöissä, kun taas kattila ja sen eri komponentit vastaavat muista voimalaitoksen pääsäädöistä. Tehonmuutosnopeutta eivät rajoita säätöjärjestelmän rajoitukset tai kattila toimilaitteena ajateltuna. Suuret lämpötilagradientit aiheuttavat lämpöjännityksiä kattilassa, jotka ovatkin usein ensimmäinen rajoittava tekijä tehon muutoksissa. [5, s. 157]

Höyryvoimalaitokset osallistuvat tänä päivänä yhä enemmän sähköntuotannon kuormituksen säätöön valtakunnallisella tasolla. Pääsyitä tähän ovat haluttomuus käyttää ydinvoimalaitoksia kuormituksen säätöön ja vesivoiman energiantuotannon jatkuva väheneminen. Nykyään rakennetaan jatkuvasti suurempia voimalaitosyksiköitä, joka lisää näiden säätövaatimuksia. Suomi toimii osana yhteispohjoismaisia sähkömarkkinoita, joka ohjaa myös energiantuotantoa, ja sähkön hinta määräytyy Suomessa vapaan kilpailun perusteella. [5, s. 157]

### 4.1 Voimalaitoksen hyötysuhde

Voimalaitosprosessin kaikki arvot pyritään pitämään lähellä suunnitteluarvoja, jolloin saavutetaan mahdollisimman korkea hyötysuhde ja vältytään laitteiden vikaantumiselta. Samalla täytyy huomioida, että pysytään annetuissa päästörajoissa ja kunnossapidon avulla varmistetaan laitoksen hyvä käytettävyys. Voimalaitoksen hyötysuhteen parantamiseen ja tuotantokustannusten alentamiseen on kehitetty erilaisia optimointijärjestelmiä. Tietokonepohjaisilla tiedonkeruujärjestelmillä saadaan kerättyä arvokasta dataa prosessin tilasta. Erilaisten analysointityökalujen avulla saadaan automaatiojärjestelmän keräämää lisäinformaatiota jäsenneltyä muotoon, josta saadaan selvitettyä optimoinnille mahdolliset kohteet. Työkalujen avulla on mahdollista selvittää eri osaprosessien taloudellisuutta voimalaitoksen eri käyttötilanteissa. Voimalaitoksen hyötysuhteeseen vaikuttavia optimoitavia tekijöitä ovat esimerkiksi ulospuhalluksen määrä, nuohouksen määrä,

tulistimien toiminta, palamisilmanjako kattilaan, pumppujen ja puhaltimien toiminta. [22, s. 160]

## 4.2 Kattilahyötysuhde

Kattilan hyötysuhde saadaan laskettua vertaamalla kattilasta saatua lämpövirtaa sinne tuotuun energiamäärään. Hyötysuhteen määrittämiseen käytetään yleisesti Euroopassa DIN 1942 –standardia. Kattilan hyötysuhde voidaan määrittää joko suoralla tai epäsuoralla menetelmällä. Suorassa menetelmässä laskentaan käytetään hyödyksi saatavaa energiavirtaa, kun epäsuora menetelmä perustuu hyötysuhteen määrittämiseen häviöiden avulla. [3]

Höyrykattilan hyötysuhteeseen vaikuttavat savukaasuhäviö, palamattoman polttoaineen häviö, säteily- ja johtumishäviöt, omakäyttöhäviö (nuohoushöyry), tuhkan ja kuonan fysikaalinen lämpöhäviö sekä ulospuhallushäviö. Säteily- ja johtumishäviöihin ei juuri-kaan voida vaikuttaa, sillä ne riippuvat lähinnä kattilan eristekerroksen ominaisuuksista. Lisäksi niihin vaikuttaa kattilarakennuksen vuodot, palamisilman ottopaikka ja ulkoilman lämpötila. Niiden määrä pysyy vakiona, joten osakuormilla niiden suhteellinen osuus kasvaa. [15]

Yleisesti paras hyötysuhde saadaan, kun kattilaa ajetaan hieman alle maksimikuorman. Tällöin lämmönsiirtimien lämpötilaerot ovat hieman pienemmät, joten savukaasua voidaan jäähdyttää enemmän, ja samalla savukaasuhäviöt pienenevät. Kirjallisuuden perusteella suurten kattilalaitosten hyötysuhde on luokkaa 0,9. [9, s. 71; 3]

### 4.2.1 Epäsuora menetelmä

Epäsuora menetelmä perustuu kattilan häviöiden määrittämiseen, joita ovat palamaton aines tuhkassa, palamattomat kaasut, tuhkan terminen lämpö, savukaasujen terminen lämpö sekä säteily- ja johtumishäviöt. Lisäksi epätaloudelliset ajotilanteet, kuten kattilan käynnistys-, pysäytys- ja läpivirtaushäviö sekä apulauhduttajan käyttö säätäjänä teollisuuden voimalaitoksissa, alentavat hyötysuhdetta. Epäsuoralla menetelmällä saadaan hyvä käsitys kattilan häviöitä aiheuttavista tekijöistä. Epäsuora hyötysuhde lasketaan kattilan hyötylämmön  $Q_{hyöty}$  ja kokonaishäviöiden  $Q_{häviö}$  avulla kaavan 5.1 mukaan [10, s. 103–105; 8 s. 31]

$$\eta = \frac{Q_{hyöty}}{Q_{hyöty} + Q_{häviö}} = 1 - \frac{Q_{häviö}}{Q_{hyöty} + Q_{häviö}}. \quad (5.1)$$

### 4.2.2 Suora menetelmä

Suorassa menetelmässä hyötysuhde lasketaan kattilasta saadun hyötylämpövirran ja kattilaan tuodun energiavirran osamääränä. Kattilaan tulevia lämpövirtoja ovat polttoaineen sitoutunut kemiallinen energia, polttoaineen esilämmitykseen sitoutunut energia, palamisilman esilämmitykseen sitoutunut energia, höyrytoimisen ilman esilämmittimen eli höyryluvon lämmitys, tulistuksen säätöön käytetty ruiskutusvesi, polttoaineen hajoitushöyry öljyä käytettäessä sekä myllyjen, pumppujen ja puhaltimien sähkömoottoreiden käyttö. Polttoainetehoa laskettaessa käytetään polttoaineen tehollista eli alempaa lämpöarvoa DIN 1942 –standardin mukaisesti. Tällöin oletetaan, että savukaasun vesihöyryn lauhtumislämpöä ei voida ottaa talteen. Amerikkalaisen standardin mukaan käytetään polttoaineen ylempää lämpöarvoa hyötysuhteen laskemiseen. Suoran menetelmän käyttämiseksi tulee tuntea polttoaineen ja palamisilman massavirrat, ominaislämmöt ja lämpötilat. Suoralla menetelmällä hyötysuhde voidaan laskea kattilasta saadun höyrytehon  $Q_{\text{höyry}}$  ja kattilaan tuodun lämpötehon  $Q_{\text{tuotu}}$  osamääränä [10, s.101–103; 14]

$$\eta = \frac{Q_{\text{höyry}}}{Q_{\text{tuotu}}} . \quad (5.2)$$

### 4.2.3 Savukaasuhäviö

Savukaasun lämpöhäviö on suurin yksittäinen häviö kattilassa ja sen osuus on noin 70–80 % kaikista kattilan häviöistä. Savukaasuhäviön suuruuteen vaikuttavat savukaasun massavirran ja loppulämpötilan lisäksi polttoaineen kosteus, kattilan mahdolliset höyryvuodot sekä savukaasujen happipitoisuus. Happipitoisuuden noustessa neljästä prosentista viiteen prosenttiin alenee voimalaitoksen hyötysuhde 0,5–0,8 %. Ilman määrää ei saa kuitenkaan laskea liian alas, jotta se vaikuta heikentävästi palamisen laatuun. Kattilaan tuodusta polttoaineen energiasta 5–10 % häviää savukaasujen mukana ympäristöön. [15, s. 17–18]

Polttoaineen kosteudella on myös merkittävä vaikutus savukaasuhäviön suuruuteen. Kosteamman polttoaineen sisältämän veden lämmittämiseen ja höyrystämiseen kuluu enemmän energiaa. Polttoaineen kosteuden muuttuessa 60 prosentista 65 prosenttiin kasvavat savukaasuhäviöt 10 prosenttia. Biopolttoaineiden kosteus siirtyy reagoimatta savukaasuihin ja kasvattaa savukaasun massavirtaa huomattavasti. Savukaasun sisältämä vesihöyry sisältää suuren energiavaraston. Savukaasuhäviö  $Q_{\text{sk}}$  määritetään kaavalla

$$Q_{\text{sk}} = (1 - q_p) m_{\text{sk}} c_{p,\text{sk}} (T_{\text{sk}} - T_0) , \quad (5.3)$$

missä  $q_p$  on savukaasuja muodostamaton polttoaineen osuus,  $m_{\text{sk}}$  on savukaasun massavirta,  $c_{p,\text{sk}}$  on savukaasun ominaislämpökapasiteetti,  $T_{\text{sk}}$  on savukaasun lämpötila ja  $T_0$  on referenssilämpötila (25 °C). Savukaasun ominaislämpökapasiteetin laskemisessa on otettu huomioon savukaasun sisältämä vesihöyry. [8, s. 27; 15, s. 17]

Savukaasun happipitoisuus on tärkein yksittäinen osatekijä kuvaamaan palamisolosuhteita. Happipitoisuuden pysyminen tavoitearvossaan kertoo hyvästä palamisesta säästämällä samalla polttoainetta. Liian suuri  $O_2$ -pitoisuus savukaasussa kasvattaa savukaasuhäviötä ja polttoaineen kulutusta, kun taas turhan pieni  $O_2$ -pitoisuus aiheuttaa epätäydellistä palamista. Happipitoisuuden nousu kasvattaa  $NO_x$ - sekä  $SO_x$ -päästöjä ja samalla pienentää  $CO$ -päästöjä. Polttoprosessissa tapahtuvat muutokset ja häiriöt ovat nopeasti nähtävissä savukaasun  $O_2$ -pitoisuudessa. [15]

#### 4.2.4 Palamattomien häviöt

Palamattomien häviöt johtuvat epätäydellisestä palamisesta tulipesässä. Ne eivät yleensä vaikuta merkittävästi kattilahyötysuhteeseen, ja niitä on helppo valvoa mittausten avulla. Palamattomien häviöt koostuvat tuhkan sekaan jäävästä jäännöskoksista, hiili-monoksidista  $CO$ , ja erilaisista hiilivety-yhdisteistä  $C_xH_y$ . Palamattomien häviöiden määrään vaikuttavat polttoaineen raekoko, riittämätön palamisilmamäärä, polttoaineen kosteus, polttolaittekonstruktio, kattilan kuorman vaihtelut sekä Low  $NO_x$  -polttotapa. Palamattomien häviöt ovat usein melko pieniä, eivätkä juurikaan vaikuta kattilahyötysuhteeseen. [15]

### 4.3 Turbiinin hyötysuhde

Turbiinissa tapahtuva höyryn paisuminen aiheuttaa häviöitä, jotka otetaan huomioon isentrooppisen hyötysuhteen avulla. Isentrooppinen hyötysuhde kertoo todellisen ja teoreettisesti hyödyksi saadun entalpiaeron suhteen. Tuorehöyryn lämpötila ja paine vaikuttavat myös turbiinin hyötysuhteeseen. Turbiinien hyötysuhteet vaihtelevat yleensä välillä 0,85–0,92 riippuen koosta ja tyypistä. [5, s. 27]

Turbiinin sisäisiä häviöitä ovat suutin-, siivistö-, ulosvirtaus-, vuoto-, pyöräkitka- ja tuuletushäviöt sekä sisäiset vesitykset. Mekaanisia eli ulkoisia häviöitä turbiinin aiheuttavat siihen liitetyt laitteet ja osat kuten voitelupumppu ja laakerit. Höyryturbiinin mekaaninen häviö on pieni 0,1–0,4 %. Generaattorin häviöt, jotka koostuvat pääasiassa sähkövirran aiheuttamista lämpöhäviöistä, ovat 1–2 % generaattorin tehosta. Lisäksi turbiinin hyötysuhdetta laskee lauhdepumpun aiheuttamat häviöt. [7, s. 27–29]

Teollisuuden vastapainelaitoksissa voimalaitoksen ensisijaisena tehtävänä on tuottaa prosessihöyryä esimerkiksi paperinvalmistukseen sekä kaukolämmitykseen. Prosessihöyrylle annetaan usein tarkat rajoitukset paineen ja lämpötilan suhteen, jolloin höyryä ei voida paisuttaa loppuun asti kuten lauhdevoimalaitoksissa. Teollisuudessa tarvitaan monesti korkeammassa paineessa olevaa höyryä, joka saadaan turbiinin välitosta, jolloin paisuminen loppuu vielä aikaisemmin ja hyötysuhde heikkenee. [5, s. 16–17]



## 4.4 Apulauhde

Teollisuuden vastapainelaitoksissa käytetään apulauhduttajaa säätäjänä tuotannon kulu-  
tusten muutoksissa. Vastapainehöyry ajetaan painerajan ylittyessä apulauhduttajaan,  
jossa raakavesi toimii jäähdyttäjänä. Periaate on sama kuin lämmönvaihtimissa. Höyryä  
voidaan ajaa myös tarkoituksella apulauhduttajaan, jotta turbiinilla saadaan tuotettua  
enemmän sähköä. Tätä toimintamallia käytetään, kun sähkön hinta on erityisen korkeal-  
la. Apulauhduttimen toimintavalmius edellyttää jäähdytysvesipumppujen jatkuvaa  
käynnissäpitoa. Taloudellisesta näkökulmasta ajatellen apulauhduttimen käyttö on har-  
voin kannattavaa.

## 5 KIINTEÄN POLTTOAINEEN VAIKUTUS ENERGIATEHOKKUUTEEN

Hämeenkyrön Voiman laitoksella käytetään polttoaineena pääasiassa haketta, turvetta, kuorta, purua ja kantoa. Lisäksi siellä poltetaan paperitehtaalla syntyvää lietettä. Syksyllä 2014 alkoi kiinteän kierrätyspolttoaineen (SRF) polttaminen, minkä tarkoituksena on voimalaitoksen polttoainevalikoiman laajentaminen sekä turpeen saatavuuden epävarmuudesta aiheutuvan riskin minimointi [23]. Taulukossa 5.1 on esitetty kiinteän polttoaineen jakauma megawattitunteina vuoden pituisella aikajaksolla 1.11.2013–31.10.2014.

*Taulukko 5.1: Hämeenkyrön biovoimalaitoksen kiinteän polttoaineen jakauma.*

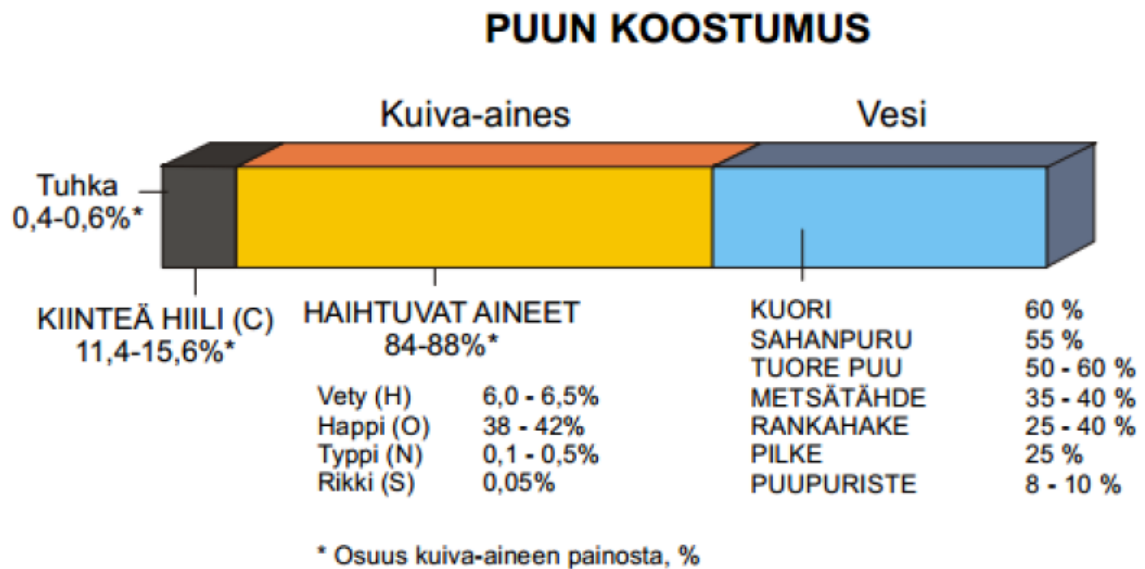
Polttoaine	MWh	%
Hake	220340	46
Turve	147235	31
Kuori	35259	7
Puru	31088	6
Kanto	22227	5
Liete	18746	4
Kierrätyspolttoaine	3734	1
Yhteensä	478629	100

Hake ja turve muodostavat lähes 80 % kiinteän polttoaineen tuottamasta energiasta. Jatkossa kierrätyspolttoaine korvaa osan turpeen määrästä, mikäli polttokokeen tulokset ovat positiivisia. Turpeen polttaminen estää kattilan korroosiota, etenkin jos muu polttoaine sisältää viherainetta. Viherainetta sisältävä polttoaine voi lisätä likaantumista suurempien alkalipitoisuuksien vuoksi, joista hankalimpia ovat kalium ja natrium. Turpeen sisältämä rikki sulfatoittaa alkalit ja haitallisesta kloorista muodostuu kloorivetyä, ja se poistuu vaaraa aiheuttamatta savukaasujen mukana. Lietteestä ei juurikaan saada lämpöarvoa, mutta logistisista syistä sen polttaminen on järkevää. [25, s. 58]

### 5.1 Puupolttoaineen ominaisuudet

Polttoaineen palaessa vapautuu energiamäärä, joka muodostuu tuotteiden ja lähtöaineiden entalpioiden erotuksesta eli reaktioentalpiasta [24, s. 2]. Puupolttoaineiden tärkeimmät rakenneaineet ovat selluloosa, hemiselluloosat ja ligniini. Eri puulajien ominaisuudet vaihtelevat hieman toisistaan. Yleisimmissä puissa männyssä, kuusessa ja

koivussa on selluloosaa 40–45 % kuiva-aineen painosta. Koivun ja muiden lehtipuiden hemiselluloosapitoisuus on 37–40 %, kun taas havupuilla se on alhaisempi 25–28 %. Hiiltä ja vetyä sisältävä ligniini sitoo puun kuidut toisiinsa ja antaa sille mekaanisen lujuuden. Koivun ligniinipitoisuus on 16–25 %, kun taas männyllä ja kuusella se on korkeampi 24–33 %. Alla olevassa kuvassa on esitelty tarkemmin puun koostumusta. [25, s. 35]



**Kuva 5.1:** Puun koostumus. [25, s. 35]

Puussa on paljon haihtuvia aineita, jonka vuoksi sen polttamisesta aiheutuu pitkät liekit ja vaatii suuren palotilan. Alkuaineita tarkastellessa huomataan puun koostuvan pääasiassa hiilestä, vedystä ja hapesta, joiden osuus puun kuiva-aineen massasta on noin 99 %. [25, s. 35]

### 5.1.1 Polttoaineen lämpöarvo ja kosteus

Lämpöarvo riippuu polttoaineen sisältämistä ainesosista ja se määritetään laboratoriomittauksilla. Ensin määritetään kosteus ja sen jälkeen ylempi sekä alempi tehollinen lämpöarvo. Lämpöarvo ilmoitetaan yleensä yksikössä MJ/kg. Kuiva-aineen lämpöarvon suuruutta voidaan arvioida laskemalla, kun tunnetaan polttoaineen koostumus. [24, s. 2–3]

Polttoaineen kuiva-aineen kalometrisella eli ylemmällä lämpöarvolla tarkoitetaan sitä lämpöenergian määrää polttoaineen massayksikköä kohti, joka vapautuu täydellisessä palamisessa ja palamistuotteiden jäähtyttyä 25 °C lämpötilaan. Polttoaineen savukaasujen sisältämä vesi oletetaan olevan nesteinä. Kun polttoaineen alkuainekoostumus tunnetaan, voidaan ylemmän lämpöarvon  $q_{hhv}$  laskemiseen käyttää Dulongin kaavaa

$$q_{hhv} = 338,2 * C + 1448,8 * (H - O/8) + 94,2 * S, \quad (5.1)$$

missä  $C$  on hiilen,  $H$  on vedyn,  $O$  on hapen ja  $S$  on rikin prosentuaalinen osuus polttoaineen koostumuksesta. [24, s. 3–4]

Kuiva-aineen tehollista lämpöarvoa arvoa laskettaessa oletetaan, että aineen sisältämän vedyn palamistuotteena syntyvä vesi sekä polttoaineen sisältämä vesi eli kosteus esiin-tyy palamisen jälkeen vesihöyrynä. Tehollinen lämpöarvo  $q_{lhv}$  voidaan laskea kalorimet-risen lämpöarvon avulla yhtälöllä [24, s. 3–4]

$$q_{lhv} = q_{hhv} - 219,6 * H. \quad (5.2)$$

Tehollinen eli alempi lämpöarvo  $q_{lw}$  ilmoittaa polttoaineen lämpöarvon saapumiskos-teudessa. Se voidaan laskea seuraavasti, kun tunnetaan kuiva-aineen tehollinen lämpö-arvo sekä polttoaineen kosteusprosentti  $w$ , [24, s. 3–4]

$$q_{lw} = q_{lhv} * \left( \frac{100-w}{100} \right) - 24,4 * w. \quad (5.3)$$

Polttoainevirta kattilaan riippuu polttoaineen lämpöarvosta, joka vaikuttaa erittäin pal-jon palamisen laatuun. Kuivempaa polttoainetta ei tarvitse syöttää kattilaan yhtä paljon kuin kosteaa. Tosin liian kuivalla polttoaineella leijupedin lämpötila voi nousta liian korkeaksi, jolloin vaarana on petihiekan sintraantuminen. Lisäksi lämmönsiirtopintoja ei ole mitoitettu näin korkeille lämpötiloille, jolloin tulistus kärsii herkästi. Toisaalta polttoaineen suuri kosteus heikentää laitoksen hyötysuhdetta, käytettävyyttä, polttoai-neen säilytystä ja palamislämpötilaa. Lisäksi polttoaineen kosteus lisää voimalaitoksen päästöjä sekä laitteiden mitoitusarvetta. Taulukossa 5.2 on esitetty Hämeenkyrön Voi-man polttoainetietoja. [27, s. 8–12]

*Taulukko 5.2: Hämeenkyrön Voiman polttoainetietoja.*

	Kuormat	Massa	Kosteus	Energia	Ylempi lämpöarvo	Alempi lämpöarvo
	[kpl]	[t]	[%]	[MWh]	[MJ/kg]	[MJ/kg]
<b>Marraskuu 2013</b>	801	21 428	51,5	46414	18,41	7,8
<b>Joulukuu 2013</b>	662	18 213	50,2	40374	18,31	8,0
<b>Tammikuu 2014</b>	837	23 904	50,1	54113	18,63	8,1
<b>Helmikuu 2014</b>	700	19 960	49,6	44899	18,30	8,1
<b>Maaliskuu 2014</b>	719	21 027	50,7	47032	18,68	8,1
<b>Huhtikuu 2014</b>	680	18 639	48,5	44313	18,73	8,6
<b>Toukokuu 2014</b>	633	17 342	48,3	40334	18,28	8,4
<b>Kesäkuu 2014</b>	446	12 232	48,4	27417	17,76	8,1
<b>Heinäkuu 2014</b>	572	15 028	45,7	35304	17,53	8,5
<b>Elokuu 2014</b>	295	8 089	44,6	20068	17,79	8,9
<b>Syyskuu 2014</b>	581	15 316	46,1	36977	18,05	8,7
<b>Lokakuu 2014</b>	594	16 857	45,8	41 661	18,18	8,9

Talvella polttoaineen kosteus on keskimäärin muutaman prosenttiyksikön korkeampi kuin muina aikoina. Kesän pienemmät massat ja kuormien lukumäärät selittyvät polttoaineen kosteuden lisäksi myös juhannus- ja vuosihuoltoseisokin avulla. Polttoaineen lämpöarvo suhteellisen tasainen ympäri vuoden suurimman pienimmän erotuksen ollessa 1,2 MJ/kg. Alemmat lämpöarvot ovat polttoaineen saapumistilassa, joten ne ovat suoraan riippuvaisia polttoaineen kosteudesta.

### 5.1.2 Savukaasuanalyysi

Savukaasuanalyysissä selvitetään savukaasun tarkempi koostumus sekä palamisreaktioihin osallistuvien aineiden määrät ja koostumukset reaktioyhtälöitä hyväksi käyttäen. Kun polttoaineen koostumus tiedetään, se jaetaan reagoiviin ja reagoimattomiin komponentteihin. Polttoaine ja ilma ovat lähtöaineita ja reaktiotuotteena syntyy savukaasu. Palamisreaktioihin tarvittava happi tuodaan palamiseen ilmaa, joka sisältää hapen O<sub>2</sub> lisäksi typpeä N<sub>2</sub>, sekä vähäisen määrän jalokaasuja (argon Ar ja neon Ne) ja hiilidioksidia CO<sub>2</sub>. Taulukossa 5.3 on esitetty kuivan ilman koostumus. [21, s. 31–39; 24, s. 10–11]

**Taulukko 5.3:** Kuivan ilman koostumus ja moolimassa. [24, s. 11]

Komponentti	Mooliosuus	Moolimassa [g/mol]	Mooliosuus*moolimassa [g/mol]
N <sub>2</sub>	0,78084	28,0134	21,8740
O <sub>2</sub>	0,20948	31,9988	6,7031
CO <sub>2</sub>	0,00032	44,01	0,0141
Ar	0,00934	39,948	0,3731
Ne	0,00002	20,179	0,0004036
Yhteensä	1	Kuivan ilman moolimassa	28,965

Kaikki ilman kaasut, paitsi happi, ovat inerttejä, eivätkä vaikuta juurikaan palamiseen. Niistä käytetäänkin usein nimitystä raakatyppi N<sub>2r</sub>. Raakatyppi ja ilman sisältämä vesi siirtyvät sellaisenaan savukaasuihin. Hapen ja raakatypen moolisuhde voidaan laskea, kun ilman koostumus tiedetään

$$\frac{N_{N2r}}{N_{O2}} = \frac{0,78084 + 0,00032 + 0,00934 + 0,00002}{0,20948} = 3,77. \quad (5.4)$$

Laskuissa käytetään polttoaineen komponenttien massaosuuksia eli hiili-, vety-, rikki-, happi-, typpi-, tuhka- ja vesipitoisuuksia. Palavia aineita näistä ovat hiili, vety ja rikki. Palamisreaktioon osallistuu myös polttoaineen happi vähentäen palamisilman tarvetta. Vettä reaktioon tulee myös palamisilman kosteudesta. Ilmassa olevan vesihöyryn mooliosuus  $y_{H_2O}$  lasketaan vesihöyryn osapaineen  $p_{H_2O}$  ja kostean ilman kokonaispaineen  $p_{tot}$  avulla [24, s. 11]

$$y_{H_2O} = \frac{p_{H_2O}}{p_{tot}}. \quad (5.5)$$

Vesihöyryn osapaine saadaan laskettua suhteellisen ilmakosteuden  $\phi$  ja kyseisessä lämpötilassa olevan kylläisen höyryn paineen tulona

$$p_{H_2O} = \phi * p'_{H_2O}. \quad (5.6)$$

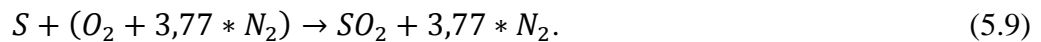
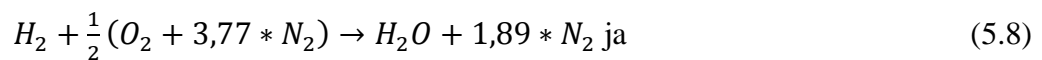
Kylläisen höyryn paineelle eri lämpötiloissa löytyy polynomisovite, josta sen voi laskea, tai sen voi katsoa esimerkiksi kylläisen veden ja vesihöyryn h,s-piirroksista. [21, s. 31–39]

Taulukossa 5.4 on Hämeenkyrön voimalaitoksen polttoaineen elementaarianalyysi. Polttoainenäytteet on kerätty neljänä eri ajankohtana Pöyry Oy:n suorittamien takuuko-keiden yhteydessä ja viimeisessä sarakkeessa on näiden keskiarvot, joita on käytetty savukaasuanalyysin tekemiseen. Polttoainesiilojen purkusuhde oli tällöin 78 % biosiilosta, 20 % turvesiilosta ja 2 % lietettä. Näytteet on analysoitu Jyväskylässä Enas Oy:n laboratoriossa.

**Taulukko 5.4:** Hämeenkyrön Voimaan polttoaineen elementaarianalyysi. [28, s. 8]

Aine	15.1.2013	16.1.2013	17.1.2013	13.8.2013	Keskiarvo
	[m-%]	[m-%]	[m-%]	[m-%]	[m-%]
Hiili	46,3	46,2	47,7	47,6	46,9
Vety	5,3	5,4	5,6	6,0	5,6
Typpi	0,3	0,4	0,5	0,3	0,4
Rikki	0,0	0,0	0,1	0,1	0,05
Tuhka	11,9	12,8	10,7	7,8	10,8
Happi	36,2	35,2	35,5	38,2	36,3
Kosteus	51,84	49,58	52,93	60,50	53,71

Savukaasun pääkomponentteja ovat hiilidioksidi  $\text{CO}_2$ , rikkidioksidi  $\text{SO}_2$  ja vesi  $\text{H}_2\text{O}$ . Hiilidioksidia syntyy hiilen palaessa, rikkidioksidia muodostuu rikin palaessa ja vettä tulee polttoaineen ja palamisilman mukana, sekä sitä muodostuu polttoaineen sisältämän vedyn reagoidessa ilman hapen kanssa. Täydellisen palamisen tapauksessa savukaasun koostumus voidaan määrittää stoikiometrisen palamisen perusteella [21, s. 34–37]. Hiilen, vedyn ja rikin palaminen on esitetty yhtälöissä 5.7–5.9



Savukaasuanalyysi on esitetty taulukossa 5.5. Palamisilmakertoimenä on käytetty 1,3 ja analyysi on tehty yhdelle kilogrammalle polttoainetta. Polttoaineen kosteus on 53,71 % taulukon 6.3 mukaisesti. Tulipesässä osa hiilidioksidista dissosioituu hiilimonoksidiksi  $\text{CO}$  ja osa tuestä dissosioituu typen oksideiksi eli  $\text{NO}_x$ -päästöiksi. Savukaasuanalyysissä on oletettu, että rikki muodostaa vain rikkidioksidia  $\text{SO}_2$ , vaikka todellisuudessa osa siitä muuntuu rikkitrioksidiksi  $\text{SO}_3$ . Rikkiä on lähtöaineena vain vähän, joten tällä ei ole juurikaan merkitystä lopputulokseen. Polttoaineen reagoivien komponenttien stoikiometrinen hapentarve on laskettu yhtälöiden 5.7–5.9 mukaan. Kunkin komponentin mooliosuus savukaasussa  $y_i$  on laskettu aineen moolimäärän  $c_i$  ja kostean savukaasun moolimäärän  $c_{\text{tot}}$  osamääränä yhtälön 5.10 mukaan [21, s. 33–37; 29]

$$y_i = \frac{c_i}{c_{\text{tot}}} . \quad (5.10)$$

**Taulukko 5.5:** Hämeenkyrön Voiman savukaasuanalyysi.

Aine	Lähtöaineet				$n_{CO_2}$ [mol]	$n_{H_2O}$ [mol]	$n_{SO_2}$ [mol]	$n_{N_2}$ [mol]	$n_{O_2}$ [mol]
	$M_x$	$m_x$	$n_x$	$n_{O_2}$					
	[g/mol]	[g]	[mol]	[mol]					
C	12,011	217,31	18,09	18,09	18,09				
H <sub>2</sub>	2,016	25,81	12,80	6,40		12,80			
S	32,066	0,21	0,01	0,01			0,01		
O <sub>2</sub>	31,999	167,91	5,25	-5,25					
N <sub>2</sub>	28,013	1,65	0,06					0,06	
H <sub>2</sub> O	18,016	537,13	29,81			29,81			
Tuhka		49,99							
Yhteensä		1000		19,25	18,09	42,61	0,01	0,06	0,00
Ilmakerroin				1,30					
Typpeä ilmasta		3,77*19,25 =		72,58				72,58	
Kuivaa ilmaa		72,58+1,3*19,25 =		97,61					
Yli-ilma		(1.3-1)*19,25 =		5,78					5,78
Kosteutta ilmassa		0,0191*91,83		1,87		1,87			
Kosteaa polttoilmaa [mol]				99,47					
Kosteaa savukaasua [mol]				140,99	18,09	44,48	0,01	72,64	5,78
$x_{CO_2}$	0,13								
$x_{H_2O}$	0,32								
$x_{SO_2}$	4,61E-05								
$x_{N_2}$	0,52								
$x_{O_2}$	0,04								
Yhteensä	1								

Taulukon perusteella huomataan, että savukaasut koostuvat pääasiassa timestä ja vesihöyrystä. Savukaasun kosteuteen vaikuttaa ilman ja polttoaineen kosteus sekä vetypitoisuus. Kun tunnetaan polttoaineen koostumus ja palamisen ilmakerroin, voidaan savukaasun massa laskea sovitteen avulla. Sillä saadaan selville, kuinka paljon savukaasua muodostuu yhdestä kilosta polttoainetta [30, s. 1898-1902]

$$m_{sk} = (2,9978 * H - 0,3747 * O + 0,3747 * S + C) * 11,115 * \lambda + (m_{pa} + m_{tuhka}). \quad (5.11)$$



## 6 VOIMALAITOKSEN ENERGIAATEHOKKUUS

Energiatehokkuudella tarkoitetaan voimalaitoksen kykyä hyödyntää polttoaineen energiasisältö mahdollisimman tehokkaasti. Kokonaishyötysuhde kertoo, miten tehokkaasti polttoaineen energia muutetaan sähköksi ja lämmöksi.

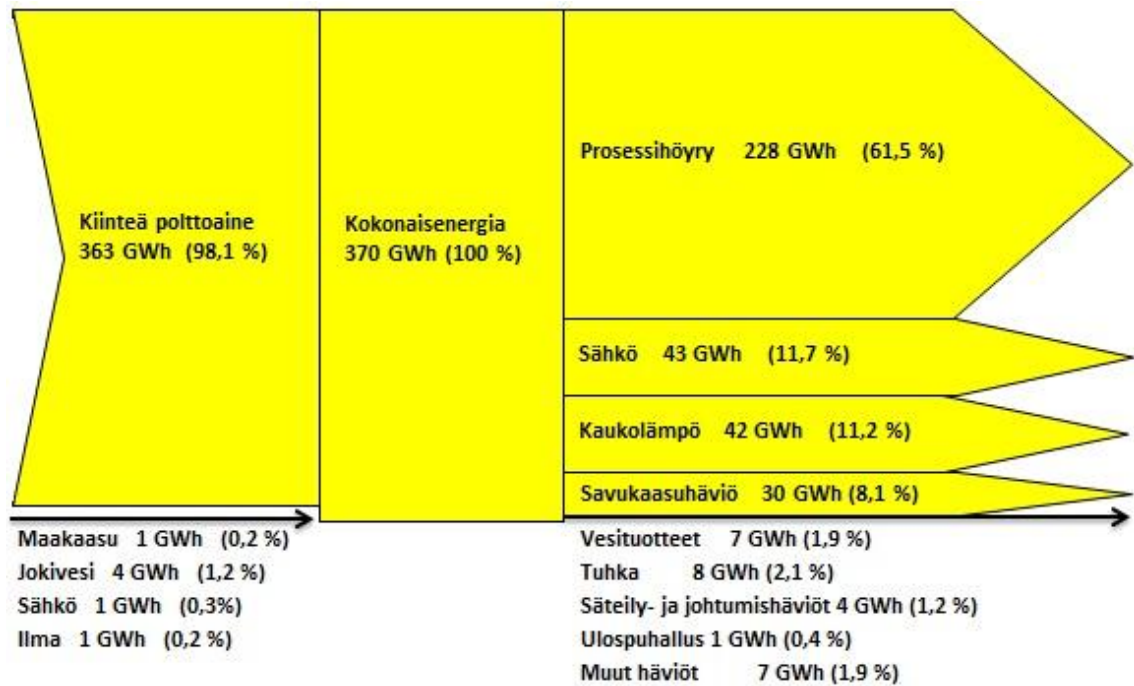
### 6.1 Kokonaishyötysuhde

Voimalaitosprosessin arvot pyritään mahdollisuuksien mukaan pitämään lähellä suunnitteluarvoja, jolloin saavutetaan korkea hyötysuhde ja laitevikoja ei esiinny herkästi. Paperi- ja kartonkikoneen toiminta sekä höyryntarve määrittelevät hyvin pitkälle voimalaitoksen ajomallin. Tuorehöyryn lämpötilan lasku 510 °C:sta 500 °C:een alentaa voimalaitoksen hyötysuhdetta noin 1 %. Voimalaitoksen kokonaishyötysuhde  $\eta_{\text{kok}}$  lasketaan kaavalla

$$\eta_{\text{kok}} = \frac{P_{\text{netto}} + Q_{\text{kl}} + Q_{\text{h}}}{Q_{\text{pa}}}, \quad (6.1)$$

missä  $P_{\text{netto}}$  on laitoksen nettosähköteho,  $Q_{\text{kl}}$  on kaukolämpöteho,  $Q_{\text{h}}$  on nettohöyryteho tehtaalle ja  $Q_{\text{pa}}$  on kokonaispolttoainetehto. [11, s. 41]

Voimalaitoksen energiataseen perusteella laaditussa sankey-diagrammissa on esitetty tulevat ja lähtevät energiavirrat. Biopolttoaineet muodostavat yli 95 % laitokselle tulevista lämpövirroista. Varapolttoaineena käytetty maakaasu on toiseksi suurin sisääntuleva lämpövirta. Yhdeksän kuukauden tarkastelujakson, 15.7.2014–15.4.2015, aikana voimalaitoksella tullut kokonaisenergia on 370 GWh. Tässä on käytetty uudempaa tarkasteluajankohtaa, jotta tulokset ovat mahdollisimmin relevantteja nykyhetkeen.

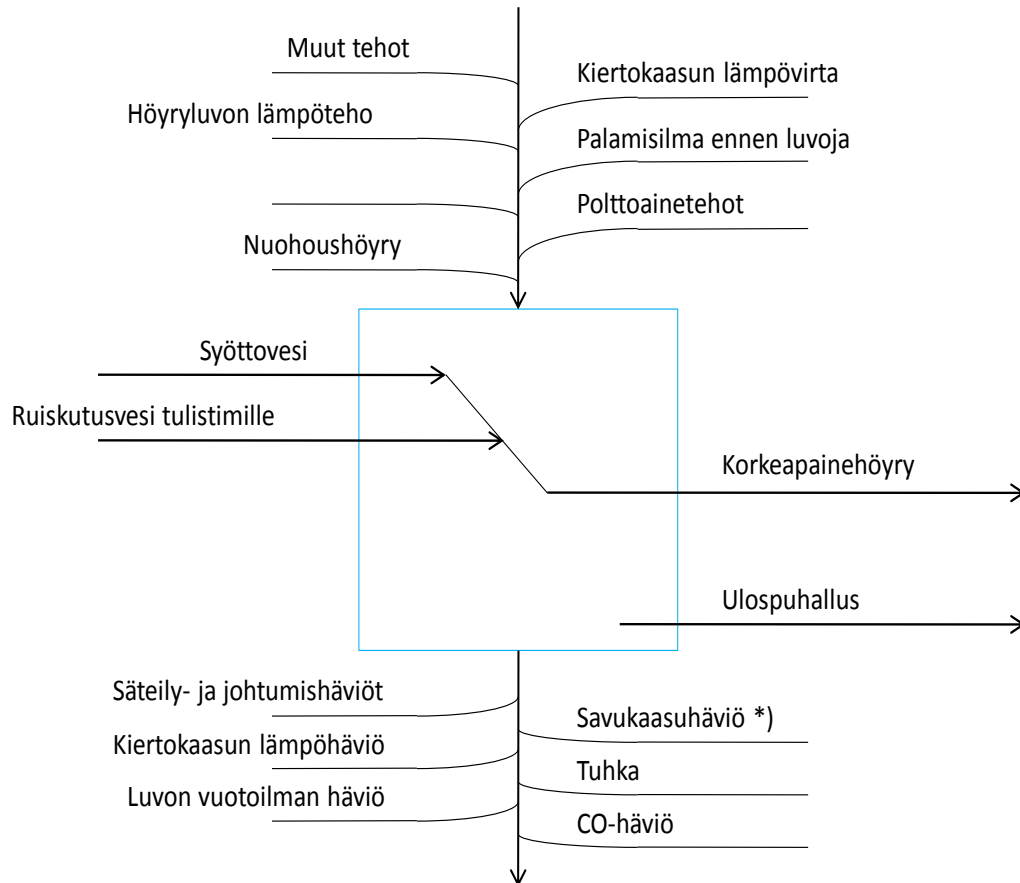


**Kuva 6.1:** Voimalaitoksen energiataseen sankey-diagrammi.

Prosessihöyryä paperi- ja kartonkikoneella kuluu 61,5 % kokonaisenergiasta. Tuotetun sähkön osuus on 11,7 %, ja tuotetun kaukolämmön osuus on 11,2 % kokonaisenergiasta. Savukaasuhäviöt ovat suurin yksittäinen häviö, jonka osuus kokonaisenergiasta on 8,1 %. Savukaasut poistuvat noin 140 celsius-asteen lämpötilassa luovuttaen lämpöenergiansa huomattavasti kylmempään ympäristöön. Savukaasun lämpötilan laskeminen parantaisi hyötysuhdetta. Lämpötilan laskemista rajoittaa rikkiä sisältävien polttoaineiden savukaasujen happokastepiste. Muut häviöt koostuvat pääasiassa lämpöhäviöiden lisäksi turbiinin, generaattorin, pumppujen ja puhaltimien häviöistä. Teollisuuden vastapainelaitoksissa käytetään apulauhduttajaa säätäjänä tuotannon kulutusten muutoksissa, joka osaltaan laskee hyötysuhdetta. Turbiinin pitkät huoltoseisokit alensivat hyötysuhdetta, koska sähköntuotantoa ei tällöin ole ollut, ja sähkö on jouduttu ostamaan verkosta.

## 6.2 Kattilahyötysuhde

Hyötysuhteen laskemiseen käytetään epäsuoraa menetelmää Metson järjestelmän mukaisesti ja laskennat perustuvat standardiin SFS-EN 12952-15. Kattilan lisäksi huomiioon otetaan vesi- ja höyrypiirit sekä ilma- ja savukaasupiirit. Laskennat perustuvat jatkuvatomisiin mittauksiin kyseisenä ajanjaksona. Kuvassa 4.1 on esitetty kaikki kattilaan tulevat ja sieltä poistuvat lämpötehot, minkä taserajana ilmalle on ennen höyryluvoja ja savukaasulle luvojen jälkeen. [8; 12]



\* ) Savukaasuhäviö sisältää nuohoushöyryn lämpöhäviön.

**Kuva 6.2:** Kattilaan tulevat ja poistuvat lämpövirrat. [8]

### 6.3 Omakäyttösähkö

Voimalaitoksen omakäyttö on sähköenergiaa, jolla ylläpidetään sähköntuotantoa ja yleistä tuotantovalmiutta. Mikäli turbiini ei ole käytössä, täytyy omakäyttösähkö hankkia voimalaitoksen ulkopuolelta. Kaikki sähkön ja lämmön tuottamiseen sekä tuotantovalmiuden ylläpitämiseen tarvittavat laitteet sisältyvät omakäyttölaitteisiin. Näiden laitteiden sähkönkulutusta mittaamalla saadaan selville omakäyttösähkön määrä. Nettosähköenergia lasketaan kokonaistuotannon ja omakäyttösähkön erotuksena. [16]

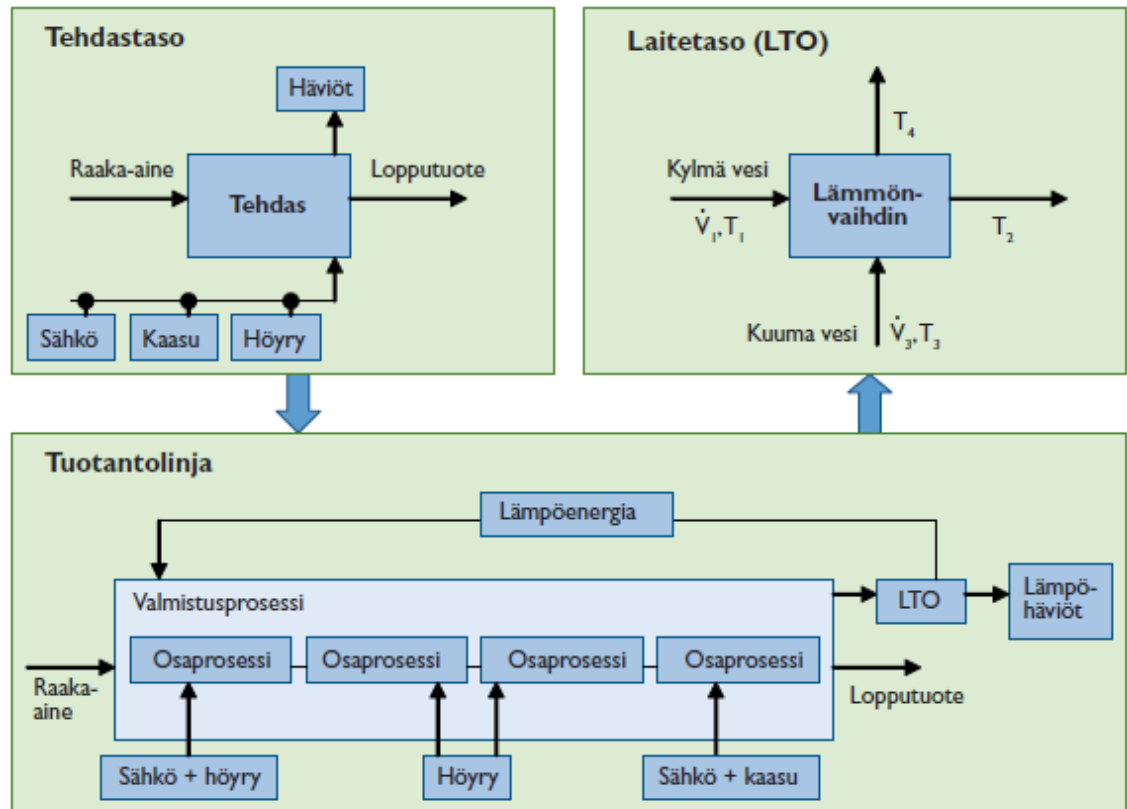
## 7 KÄYTÖNAIKAISEN OPTIMOINNIN MITTARIT

Energiatehokkuuden valvontasovelluksen olennaisin osa on käytönaikaisen optimoinnin mittarit. Niiden avulla kyetään tarkkailemaan laitoksen käyttäytymistä eri toimintapisteissä ja vertailemaan sitä vastaaviin tilanteisiin historiatietojen perusteella. Käytönaikaisen optimoinnin tavoitteena on tuottaa mahdollisimman paljon energiatuotteita tietyllä polttoainemäärällä. Pienetkin muutokset prosessissa tai sen ajotavassa voivat johtaa merkittäviin säästöihin pitkällä aikavälillä. [31, s. 1]

Voimalaitosprosessin optimoinnissa täytyy ottaa huomioon laitostyyppin erityispiirteet. Biopolttoaineen laatuun ja palamiseen liittyvä epävarmuus ja vaihtelu vaikuttavat suoraan tuorehöyryn arvojen tasapainoon ja pysyvyyteen. Tämän vuoksi prosessia tasaavat säätö- ja optimointiratkaisut ovat erittäin tärkeitä. Voimalaitoksen toiminnan optimoinnilla pyritään vähentämään häviötehoja ja mahdollistamaan energiatehokas toiminta. Käytönaikaisella optimoinnilla ja energiatehokkuuden parantamisella voidaan Suomen ympäristökeskuksen raportin mukaan tarkoittaa kolmea eri asiaa [36, s. 20]:

1. Sama tuotantomäärä tai tuotannon arvo saavutetaan pienemmällä energian kuluksella.
2. Suurempi tuotantomäärä tai tuotannon arvo saavutetaan samalla energiankuluksella.
3. Tuotantomäärän tai tuotannon arvon kasvu aikaansaadaan suhteellisesti alhaisemmalla energiankulutuksen kasvulla.

Ensin täytyy selvittää energian kulutus kohteittain, prosessien toiminnan taso, energia- ja raaka-ainevirrat. Näiden perusteella luodaan mittarit, jolloin käytönaikainen optimointi osataan kohdentaa oikein. Tärkeimmät kohteet ovat prosessiautomaatio, säätösuunnittelu sekä ajotapojen optimointi. Tuotantoprosessin rakenne on kokonaisuutena tunnettava tarkkaan. Mittaroinnin tavoitteena on luoda käyttöhenkilökunnalle työkalu, jolla valvotaan yksittäisen laitteen, osaproessin, prosessin, tuotantolinjan, tehtaan tai jopa koko tehdasalueen energiankäyttöä ja -tehokkuutta. Käyttöhenkilökunta reagoi mahdollisiin poikkeamiin tehden tarvittavia muutoksia prosessiin. Historiatietojen perusteella on kullekin mittauskohteelle luotu referenssitaset erilaisiin ajotilanteisiin. Energiatehokkuuden laskiessa voidaan jälkikäteen tutkia mahdollisia laskuun johtaneita syitä ja kehittää järjestelmää edelleen. Kuvassa 7.1 on selvennetty energiatehokkuuden mittarointia. [32; 36, s. 24]



**Kuva 7.1:** Energiatehokkuuden mittarointia eri tarkkuustasoilla. [36, s. 25]

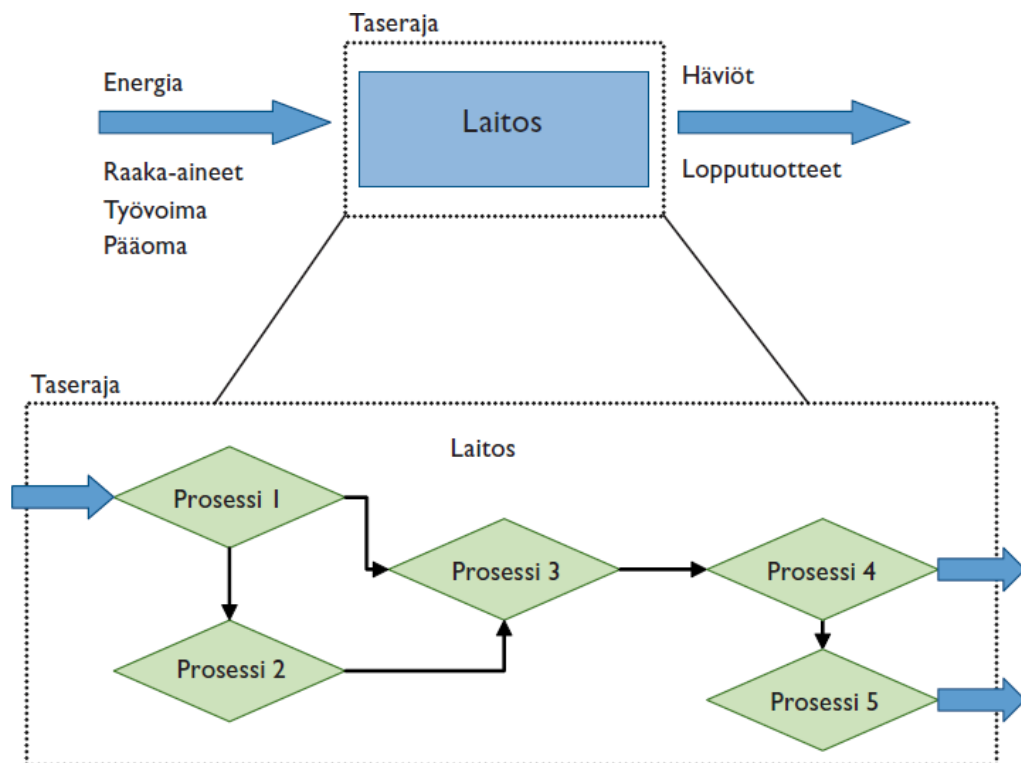
Energiatehokkuuden mittaaminen ei ole yksiselitteistä, vaan vaaditaan useita kuvaavia mittareita, jotta kyetään selvittämään energiatehokkuuden kehittyminen. Energiatehokkuuden mittaaminen voidaan karkeasti jakaa neljään osa-alueeseen. Nämä ovat termodynaamiset, fysikaalis-termodynaamiset, taloudellis-termodynaamiset ja taloudelliset. Käyttämällä mittareita joka osa-alueesta saadaan energiatehokkuutta seurattua mahdollisimman tarkasti. Termodynaamisilla mittareilla tarkoitetaan sisään tulevaa ja prosesseista käyttöön saatua energiaa, jolloin yksikkönä on watti tai joule. Fysikaalis-termodynaamiset mittarit esittävät lisäksi poistuvan energian fysikaalisilla yksiköillä. Taloudellis-termodynaamiset mittarit esittävät sisään tulevan energian termodynaamisilla yksiköillä ja prosessin ulostulo on mitattu markkinahinnalla. Taloudelliset energiatehokkuuden mittarit perustuvat markkinahintoihin. [33]

Voimalaitosprosessi on monimutkainen kokonaisuus, joten käytönaikaisen optimoinnin mittareita valitessa tulee rajata tarkasteltava järjestelmä. Mittarin käyttötarkoitus ja kohde vaikuttavat halutaanko mittaria seurata tunti-, vuorokausi-, viikko-, kuukausi- vai vuositasolla. Lyhyemmällä ajanjaksolla saadaan yksityiskohtaisempaa tietoa ja sitä paremmin energiatehokkuutta voidaan kehittää. Tällöin myös varsinainen käytönaikainen optimointi pystytään suorittamaan käyttöhenkilökunnan toimesta. [36, s. 24]

Luotettavat mittaukset ovat ehdoton edellytys energiatehokkuuden valvonalle. Energiatehokkuuden optimoinnin tehostamiseksi on huomioitava koko mittausketju, eikä

ainoastaan yksittäisiä mittalaitteita. Energiatehokkuuden mittaongelmat eivät ole vain mittausteknisiä, vaan usein virheet syntyvät matkalla mittarin milliampeeriviestistä tuotantoraporttiin. Kun energiatehokkuuden mittarit on liitetty osaksi tuotannonohjausjärjestelmää, on helpompi yhdistää energiankulutuksen poikkeamat prosessissa tapahtuneisiin muutoksiin. Muutoksia prosessiin aiheuttaa ajomallien vaihteluiden lisäksi erilaiset häiriöt ja käyttökatkot. Käytönaikaisen optimoinnin mittarit eivät sovi sellaisenaan jokaiselle voimalaitokselle, vaan ne pitää räätälöidä laitoskohtaisesti. [34, s. 1; 36, s. 24]

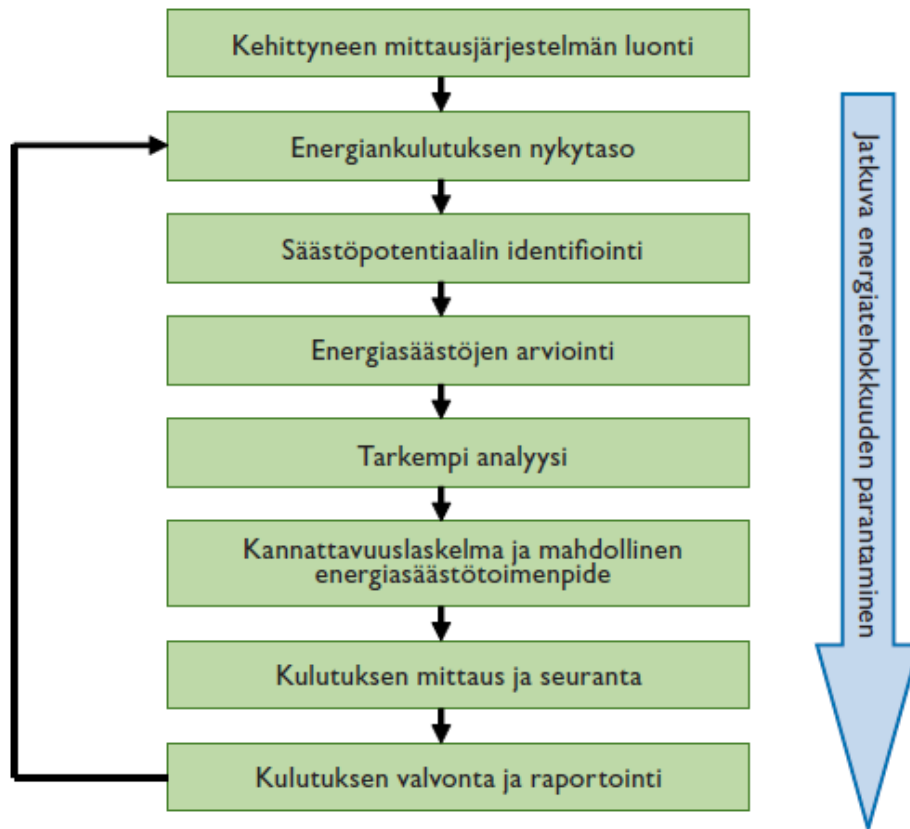
Prosessikohtainen energiatehokkuuden seuranta aiheuttaa riskin, että jätelämpövirtojen hyödyntämistä ei voida ottaa huomioon optimaalisesti ja se aiheuttaa vääristymää laitostasolla. Toisaalta laitostason optimointi ei välttämättä aina johda parhaaseen mahdolliseen lopputulokseen, sillä kaikkien osaprosessien tai lämpövirtojen yhdistäminen ei onnistu toisiinsa esimerkiksi pitkien etäisyyksien takia. Taserajojen määrittely on tärkeää optimaalisen tuloksen saavuttamiseksi kulloinkin vallitsevassa tilanteessa. Taserajan määrittelyssä täytyy välillä tehdä kompromisseja, jolloin on oleellista ymmärtää taserajan merkitys energiatehokkuudelle. Kuvassa 7.2 on mitä laitostason taserajat pitää sisälleen. [36, s. 24–25]



**Kuva 7.2:** Laitostason taseraja pitää sisällään kaikki tuotannon prosessit. [36, s. 25]

Laajalla energiatehokkuuden mittaroinnilla mahdollistetaan erilaisten energiatehokkuusohjelmien, käytönaikaisen optimoinnin ja laiteinvestointien todellisia vaikutuksia. Jatkuvan energiatehokkuuden valvonnan ja tehostamisen tulisi olla osa voimalaitoksen päivittäistä toimintaa. Voimalaitoksen energiatehokkuuden parantamisen ajattelumallia

on selvennetty kuvassa 7.3. Aktiivinen puuttuminen energiatehokkuuden kehittämiseen edellyttää voimalaitokselta konkreettisen vertailupohjan, mittausdatan sekä tavoitteen. [36, s. 27]



**Kuva 7.3:** Energiatehokkuuden jatkuva kehittäminen voimalaitosympäristössä. [36, s. 28]

## 7.1 Mittareiden sovitus

Mittareita luodessa huomattiin, että on tärkeää ottaa huomioon suureiden väliset yhteydet. Eri energiatehokkuusmittareiden tavoitearvot vaihtelevat voimalaitoksen erilaisten ajotilanteiden mukaan esimerkiksi tehoalueen vaihtuessa. Sovelluksen mittareiden muodostamiseen on käytetty regressiomallinnusta, jossa tarkasteltavaa suuretta voidaan mallintaa yhden tai useamman apusuureen avulla. Matemaattisia malleja ei välttämättä voida käyttää kaikissa tilanteissa, vaan jokainen tapaus on mietittävä erikseen. Sovitteita määrittäessä suodatettiin osa datasta pois, jotta sovitteet vastaisivat paremmin voimalaitoksen päivittäistä toimintaa. Datasta suodatettiin pois seisokkijaksot sekä muut epäoleelliset tehoalueet.

Tavoitearvot voidaan määrittää revisioiden jälkeisten arvojen mukaan, kunnonvalvontamittauksissa selvitettyjen tasojen perusteella tai historiatiedoista kerättyjen referenssilukujen mukaan. Kaikilla tavoilla saadaan selville laitteiden ja prosessien tavoitearvot ja toimintapisteet eri tehoalueilla. Isoja revisioita ei ole Hämeenkyrössä vielä ollut kaikille

laitteille, sillä voimalaitos valmistui vuonna 2012. Sovitteiden muodostamiseen on käytetty historiadatasta saatuja referenssiarvoja.

### 7.1.1 Pienimmän neliösumman menetelmä

Kuvaajiin on piirretty sovitesuoria ja -käyriä Microsoft Excel –ohjelmalla. Ohjelmassa käytetään pienimmän neliösumman menetelmää lineaarisen regressiosovitteen luomiseksi. Pienimmän neliösumman menetelmässä pyritään saamaan mahdollisimman pieni jäännös- eli virhetermien neliösumma valitsemalla tietyt regressiokertoimien estimaattorit. [37, s. 105]

Selitettävän muuttujan  $y$  havaittujen arvojen vaihtelu halutaan selittää selittävien muuttujien eli selittäjien  $x_1, x_2, \dots, x_n$  havaittujen arvojen vaihtelun perusteella. Regressiokäyrä voidaan muodostaa selittävien ja selittäjien perusteella. Tuntemattomat parametrit  $a_1, a_2, \dots, a_n$  määräävät käyrän  $y = f(x)$  muodon. Parametrien arvot saadaan selvälle minimoimalla mitattujen ja mallin avulla laskettujen  $y$ :n arvojen erotusten neliösumma. Neliösumma osittaisderivoidaan parametrin suhteen minimiarvon saamiseksi kaavalla

$$\frac{\partial}{\partial a_k} \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i; a_0, \dots, a_m))^2 = 0, \quad \text{kun } k = 0, \dots, m, \quad (7.1)$$

missä  $a_k$  on mallin parametri,  $x_i$  on selittävä suure,  $y_i$  on selitettävä suure ja  $m$  sekä  $n$  kuvaavat parametrien ja mittausten lukumääriä.

Muuttujien  $x$  ja  $y$  oletetaan olevan lineaarisia toisilleen, jolloin  $y = a_1x + a_0$  neliösumman yhtälöryhmä voidaan ratkaista kaavalla

$$\frac{\partial}{\partial a_k} \sum_{i=1}^n (y_i - a_1x_i - a_0)^2 = 0, \quad \text{kun } k = 0, 1. \quad (7.2)$$

Parametrit  $a_0$  ja  $a_1$  saadaan ratkaistua kaavoilla

$$a_1 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \text{ ja} \quad (7.3)$$

$$a_0 = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \bar{y} - a_1 \bar{x}. \quad (7.4)$$

Pienimmän neliösumman menetelmää voidaan soveltaa myös epälineaarisille yhtälöille, sillä paraabeli  $y = a_2x^2 + a_1x + a_0$  on lineaarinen parametrien  $a_k$  suhteen, vaikka se on epälineaarinen  $x$ :n suhteen. [37, s. 105–110]



### 7.1.2 Korrelaatiokerroin

Korrelaatiolla tarkoitetaan kahden tilastollisen muuttujan välistä riippuvuutta. Mallin ja havaintojen yhteensopivuutta tarkastellaan korrelaatiokertoimen  $r$  avulla. Korrelaatiot toimivat perustana muuttujien välisten riippuvuuksien ymmärtämiselle. Korrelaatiokerroin lasketaan muuttujien  $x$  ja  $y$  keskihajontojen  $s_x$  ja  $s_y$  sekä kovarianssin  $s_{xy}$  arvojen perusteella. Varianssilla  $s_x^2$  kuvataan satunnaismuuttujien etäisyyttä eli hajontaa niiden odotusarvosta. Keskihajonta  $s_x$  on varianssin positiivinen neliöjuuri ja esittää  $x$ :n arvojen keskimääräistä poikkeamaa odotusarvosta. Odotusarvolla tarkoitetaan tehtyjen havaintojen aritmeettista keskiarvoa. Varianssi muuttujalle  $x$  lasketaan kaavalla [37, s. 10]

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (7.5)$$

Muuttujien keskihajontaan perustuva kovarianssi ei ole täysin yksiselitteinen mitta. Tämän vuoksi eri tilanteiden kelvolliseen vertailuun tarvitaan korrelaatiokerroin  $r$ , joka määritetään kaavalla

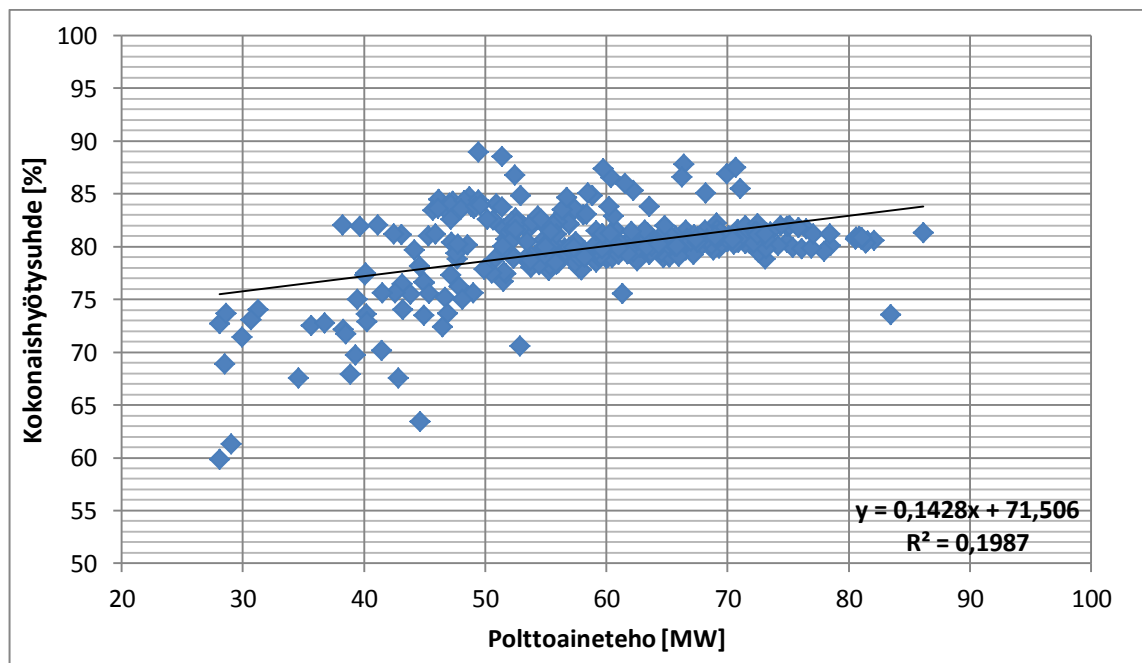
$$r = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (7.6)$$

Korrelaatiokerroin saa arvoja välillä  $-1 \leq r \leq 1$ , jos korrelaatio saa arvon  $r = \pm 1$ , niin muuttujat  $x$  ja  $y$  ovat toisistaan lineaarisesti riippuvaisia. Korrelaation voidaan todeta olevan voimakasta korrelaatiokertoimen itseisarvon ollessa  $|r| \geq 0,8$ , merkittävä  $0,6 \leq r \leq 0,8$ , kohtalainen  $0,3 \leq r \leq 0,6$  ja merkityksetön, kun korrelaatiokerroin on pienempi kuin 0,3. [38]

## 8 ENERGIATEHOKKUUDEN ONLINE-SEURANTATYÖKALUN SUUNNITTELU

Voimalaitoksen energiatehokkuutta on analysoitu vuoden mittaisella ajanjaksolla 1.11.2013–31.10.2014. Datasta on suodatettu normaaliajon ulkopuolinen osa, sillä tarkoituksena on keskittyä päivittäisen käynnin optimointiin. Normaaliajon ulkopuolisella osalla tarkoitetaan seisokkeja, häiriötilanteita sekä alas- ja ylösajotilanteita.

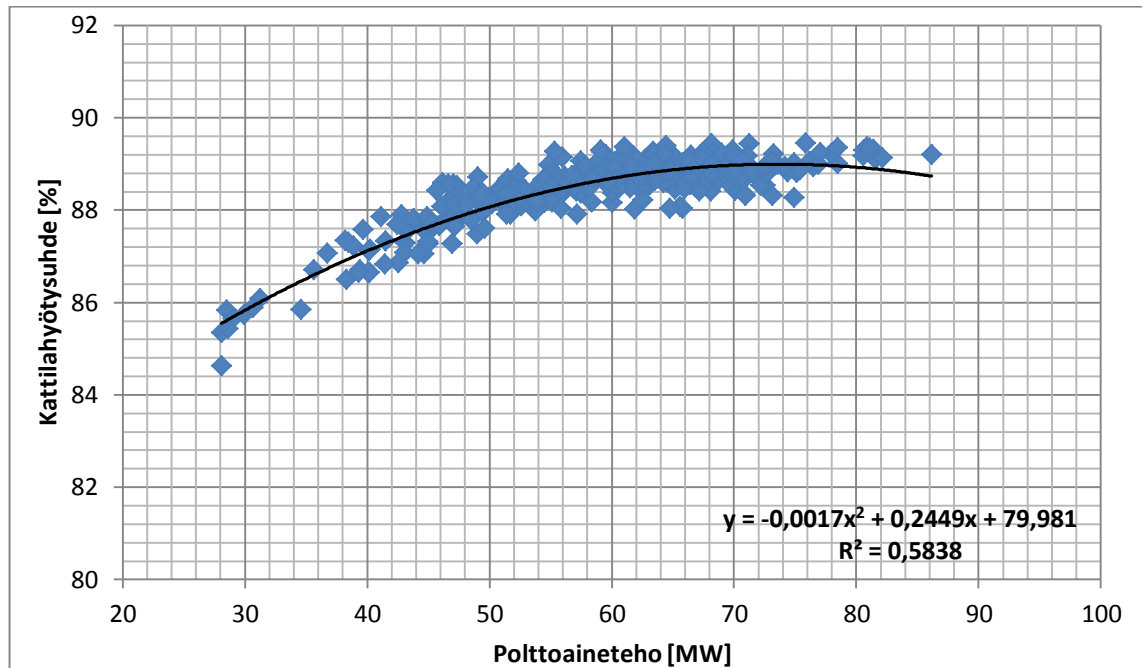
Polttoaineen koostumus vaihtelee jatkuvasti, eikä ole tarkkaa tietoa mitä polttoaineita poltetaan ja miten paljon. Polttoaineen laatuvaihtelut, pääosin kosteuden, on suurimpia häiriötekijöitä. Teollisuuden vastapainelaitoksessa myös suuret kuorman vaihtelut vaikeuttavat energiatehokkuusmittareiden seuraamista. Kuvassa 8.1 on esitetty voimalaitoksen kokonaishyötysuhde polttoainetehon funktiona. Hyötysuhteen arvot vaihtelevat hyvin paljon, etenkin pienillä polttoainetehon arvoilla.



**Kuva 8.1:** Voimalaitoksen kokonaishyötysuhde polttoainetehon funktiona.

## 8.1 Kattilahyötysuhde

Kattilahyötysuhde lasketaan epäsuoralla menetelmällä, joka on esitetty kaavassa 5.1. Savukaasuhäviö on suurin yksittäinen kattilahyötysuhdetta laskeva tekijä. Kaikki kattilahyötysuhteeseen vaikuttavat tekijät on esitetty luvussa 4.2. Kuvassa 8.2 on esitetty kattilan K8 hyötysuhde polttoainetehon funktiona.

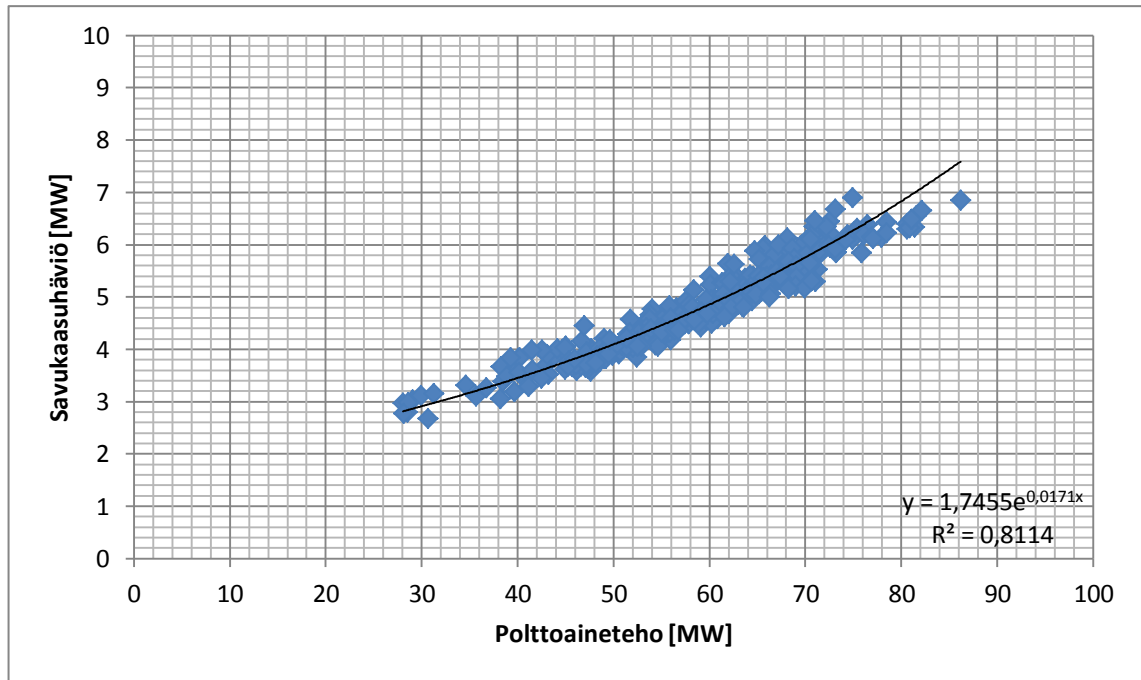


**Kuva 8.2:** Kattilan K8 hyötysuhde polttoainetehon funktiona.

Kattilahyötysuhteen huomataan olevan pienillä kuormilla huomattavasti alhaisempi. Polttoainetehon ylittäessä 55 MW, hyötysuhde ei juuri enää muutu. Kattilahyötysuhde seuraa melko hyvin sovitekäyrää. Ongelmana on kokonaisuudessaan pari prosenttiyksikköä liian alhaiset arvot, sillä kattilahyötysuhteen tulisi olla suurilla kuormilla yli 90 %.

### 8.1.1 Savukaasuhäviö

Savukaasuhäviön suuruuteen vaikuttavat savukaasun loppulämpötila sekä happipitoisuus. Savukaasun happipitoisuuteen voidaan vaikuttaa ilmasäädöillä. Savukaasun loppulämpötilan noustessa savukaasuhäviön määrä luonnollisesti kasvaa, ja samalla polttoaineen kulutus kasvaa. Savukaasun lämpötilaan voi vaikuttaa likaantuneet lämpöpinnat, jolloin lämmönsiirto on heikentynyt, tai höyryluvon käyttö. Hämeenkyrön kattilassa on käytössä putkiluvo, joten luvon vuotoilmaa ei tarvitse huomioida. Palamattomien (CO) lämpöhäviö on niin pieni, alle 1 MW vuodessa, että sitä ei käsitellä tässä laisinkaan. Savukaasuhäviö kasvaa eksponentiaalisesti polttoainetehon kasvaessa, kuten huomataan kuvasta 8.3.

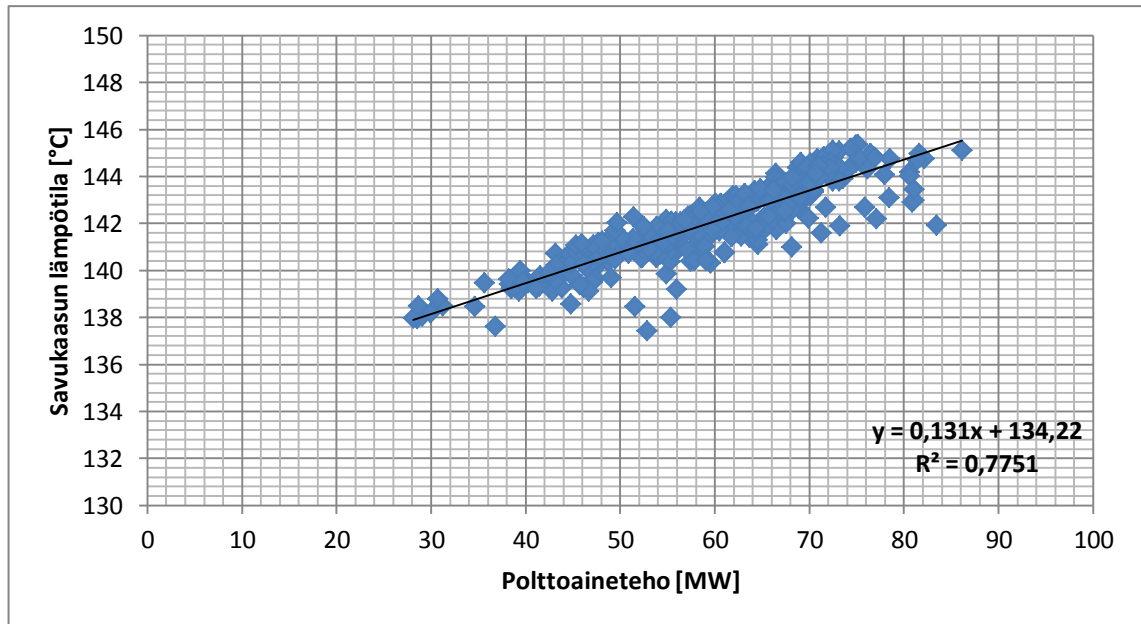


**Kuva 8.3:** Savukaasuhäviö polttoainetehon funktiona.

Savukaasuhäviö kasvaa yli kaksinkertaiseksi täydellä kuormalla ajattaessa. Savukaasuhäviön suuruuteen voidaan vaikuttaa päivittäin optimoimalla savukaasun loppulämpötilaa sekä happipitoisuutta.

#### 8.1.1.1 Savukaasun loppulämpötila

Savukaasun loppulämpötilan asetusarvo on Hämeenkyrössä ollut käytännössä aina 140 °C. Loppulämpötilan alentamista tutkitaan yhdessä kattilan toimittaneen Andritz Oy:n kanssa. Rajoittavana tekijänä alentamiseen on happokastepiste. Savukaasun loppulämpötila polttoainetehon funktiona on esitetty kuvassa 8.4.

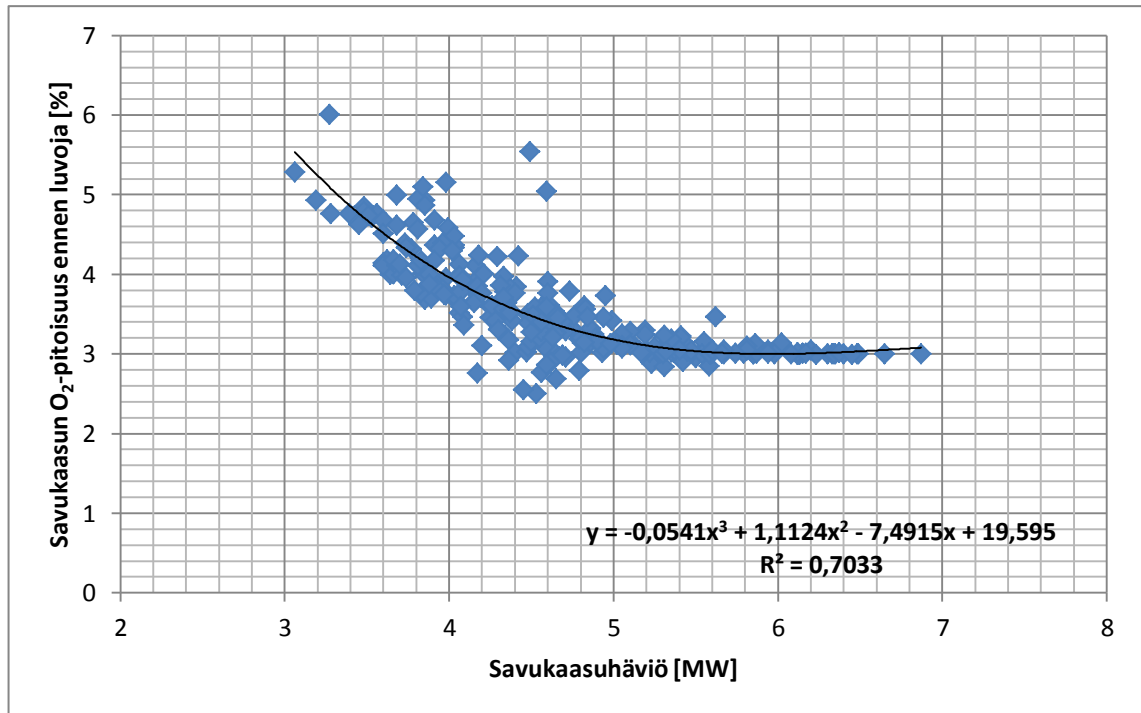


**Kuva 8.4:** Savukaasun lämpötila polttoainetehon funktiona.

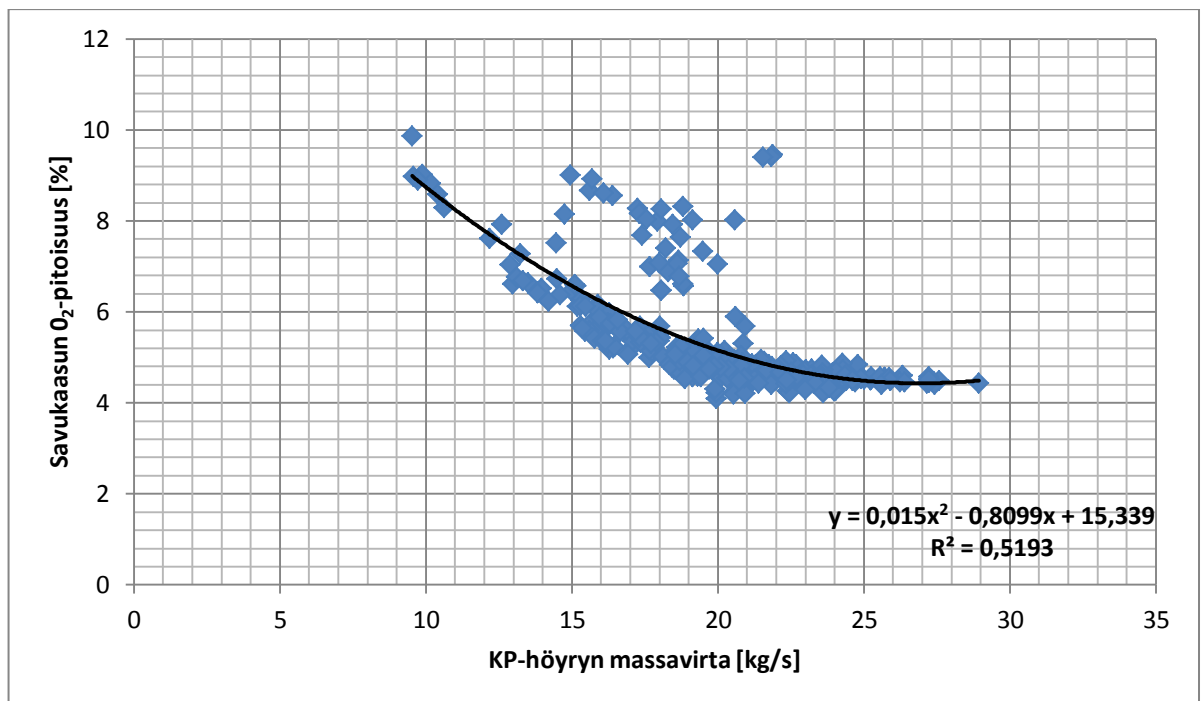
Savukaasun lämpötila on suurimman osan ajasta selkeästi yli asetusarvon. Vain pienillä polttoainetehoilla, alle 50 MW, lämpötila pysyy asetusarvossa tai on hieman sen alapuolella. Savukaasun loppulämpötilan ei tulisi olla riippuvainen voimalaitoksen kuormasta, vaan höyryluvojen pitäisi samalla säätää savukaasun lämpötilaa. Pienemmällä savukaasun loppulämpötilalla saavutettaisiin korkeampi lämpöteho kattilassa.

#### 8.1.1.2 Savukaasun happipitoisuus

Savukaasun happipitoisuus ennen luvoja kertoo palamisen puhtaudesta kattilassa. Mikäli happipitoisuus olisi pieni, palaminen olisi epätäydellistä, jolloin polttoaineen sisältämästä lämpöenergiasta jäisi suurin osa hyödyntämättä. Yleensä ongelmana on kuitenkin liian suuri happipitoisuus, joka kasvattaa savukaasuvirtaa ja sitä kautta sekä savukaasun lämpöhäviötä että polttoaineen kulutusta. Savukaasun happipitoisuuden mittaukset sijaitsevat tulipesän yläosassa, 2-vedossa, 3-vedossa ja piipussa. Kuvassa 8.5 on esitetty savukaasun  $O_2$ -pitoisuus ennen höyryluvoja savukaasun lämpöhäviön funktiona, ja kuvassa 8.6 on savukaasun  $O_2$ -pitoisuus savupiipussa korkeapainehöyryn massavirran funktiona.



**Kuva 8.5:** Savukaasun happipitoisuus ennen luvoja savukaasun lämpöhäviön funktiona.



**Kuva 8.6:** Savukaasun happipitoisuus savupiipussa korkeapainehöyryn massavirran funktiona.

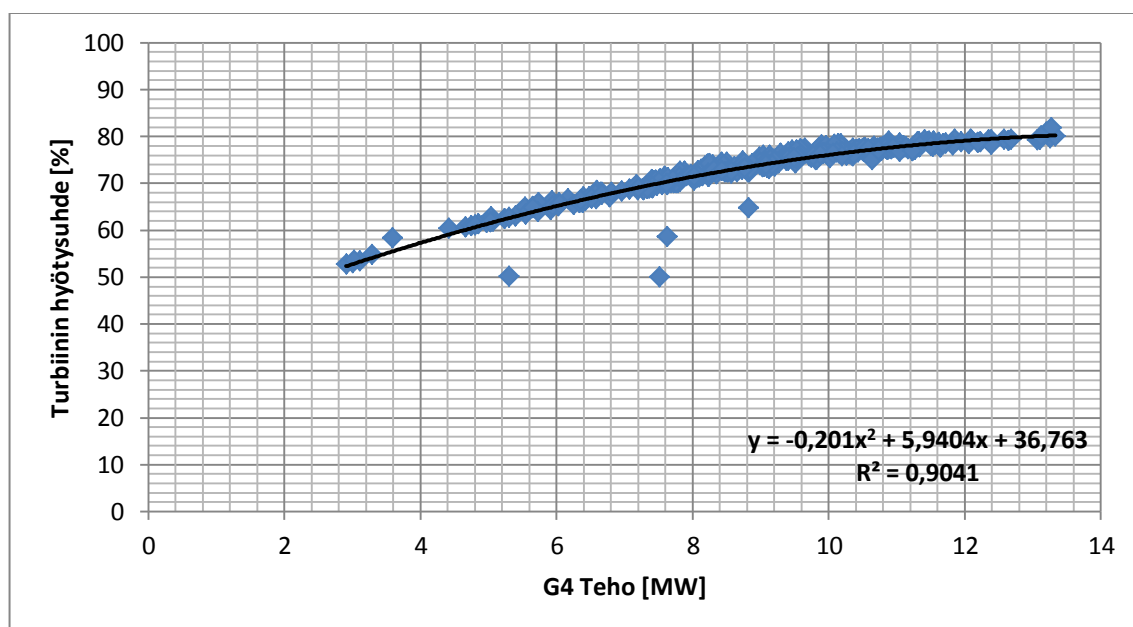
Ylemmässä kuvassa huomataan happipitoisuuden tasoittuvan selkeästi 3 % tavoitearvoonsa suuremmilla kuormilla ajettaessa. Pienillä kuormilla jäännöshapen arvo on hie-  
man liian korkea. Kuvan 8.6 perusteella voidaan todeta savukaasun happipitoisuuden  
myös oletetusti pienenevän suuremmilla kuormilla. Regressiokäyrän yläpuolelta löytyy

jonkin verran mittaustuloksia erityisesti tuorehöyryn massavirran ollessa välillä 14–22 kg/s. Tällöin operaattoreiden ilmasäädöillä olisi voitu saavuttaa taloudellisempi ajomalli.

## 8.2 Turbiini

Turbiinista saatava sähköteho riippuu korkeapainehöyryn massavirrasta, paineesta ja lämpötilasta. Tuorehöyryn paineen ja lämpötilan nostaminen kasvattavat turbiinin sähkötehoa. Paineen ja lämpötilan nostamista rajoittavat turbiinin ja kattilan materiaalien lujuus- sekä lämmönsieto-ominaisuudet. Turbiinin ohjeellisten raja-arvojen sisällä kattilan tuottaman höyryn painetta ja lämpötilaa voidaan manuaalisesti säätää kattilan kuorman muuttuessa oleellisesti. Minimikuormalla sähkön hinta määrittelee kannattaako turbiinin läpi ajaa mahdollisimman paljon höyryä.

Hämeenkyrössä käytössä oleva turbiini on melko iäkäs ja moneen kertaan remontoitu sekä monesta kohtaa paikattu. Täten sillä ei enää päästä yhtä korkeisiin isentrooppisiin hyötysuhteisiin, kun turbiineille normaalisti oletetaan (0,88–0,92) [5, s. 27]. Hämeenkyrön Voiman ensisijaisena tehtävänä on kuitenkin prosessihöyryn tuottaminen kartonki- ja paperikoneelle, ja sähkön tekeminen on vasta toissijainen tehtävä. Alla olevassa kuvassa on esitetty turbiinin isentrooppinen hyötysuhde sen tuottaman sähkötehon funktiona.



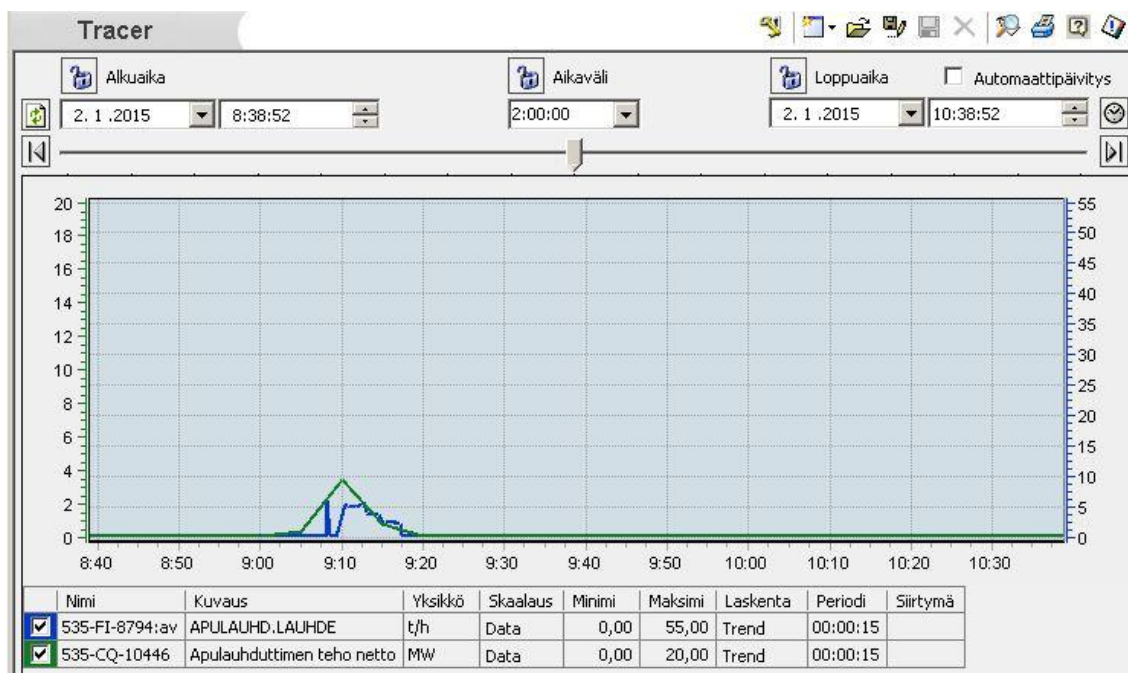
*Kuva 8.7: Turbiinin isentrooppinen hyötysuhde generaattorin tuottaman tehon funktiona.*

Vuoden pituisen jakson mittausdata muodostaa hyvin tasaisen ja selkeän mallin, josta kertoo myös lineaarisen regressiokäyrän korrelaatiokertoimen korkea arvo. Oikeastaan vain neljä pistettä jää selkeästi regressiokäyrän alapuolelle. Tämä johtuu todennäköisesti

nopeista kuorman vaihteluista, jolloin turbiini ei ole ehtinyt täysin reagoimaan nopeisiin muutoksiin ja höyryä on mennyt hukkaan. Turbiini saavuttaa parhaimmillaan 80 prosentin hyötysuhteen, johon se näyttääkin regressiokäyrän mukaan tasaantuvan.

### 8.2.1 Apulauhde

Teollisuuden vastapainevoimalaitoksissa apulauhdutinta käytetään tarvittaessa alentamaan prosessihöyryn painetta. Jos vastapaine nousee asetusarvon ylärajalle, apulauhduttimen automaattiventtiili aukeaa ja osa höyrystä ohjataan apulauhduttimeen, jotta vastapaine saadaan pidettyä raja-arvojen sisällä. Apulauhdutin toimii kuten suuri lämmönsiirrin. Tässä tapauksessa jäähdytysvetenä käytetään järvivettä, johon höyry siirtää lämpöenergiansa ja lauhtuu vedeksi. Putkirakenteisessa lauhduttimessa raakavesi ei sekoitu voimalaitosprosessin veteen. Ajoittain apulauhdetta ajetaan kuitenkin turhaan liian pitkään, jolloin prosessinhoitajilla on mahdollisuus vaikuttaa tilanteeseen. Kuvassa 8.8 on esitetty trendinäytöllä apulauhteen massavirta sekä teho.



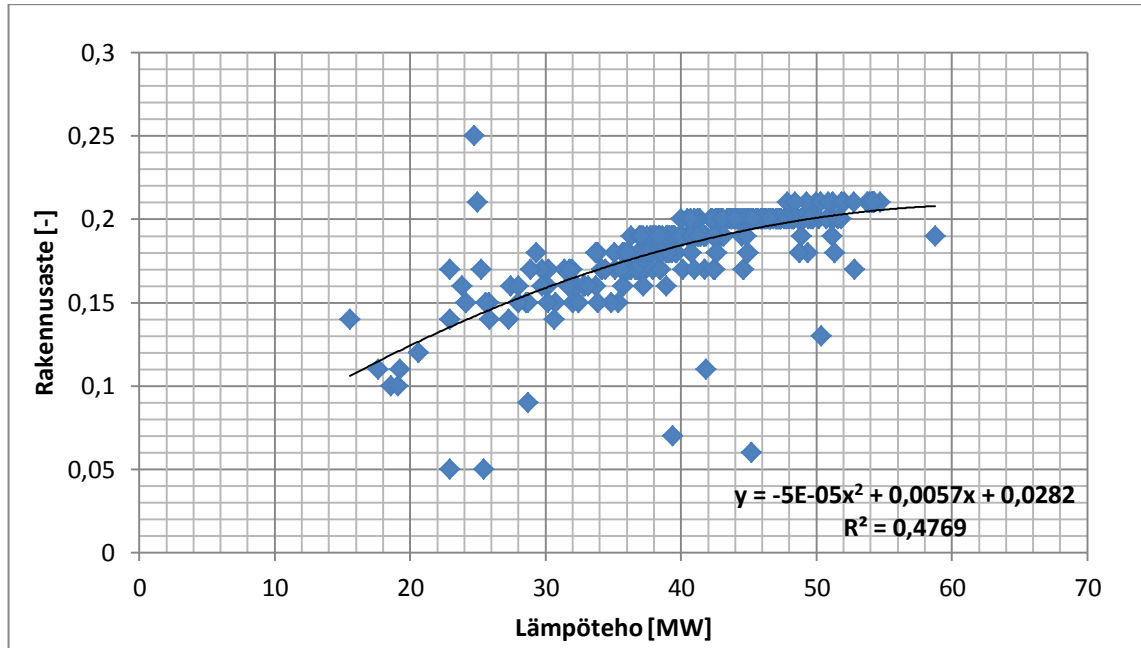
**Kuva 8.8:** Apulauhteen massavirran ja tehon trendinäyttö.

Trendinäytön y-akselina on aika, jossa näkyy viimeisen kahden tunnin tapahtumat. Tämän näytön avulla käytönaikaisen optimoinnin suorittaminen helpottuu. Lisäksi päänäytöllä on esitetty apulauhteen hukkalämmöstä aiheutuvat kulut. Kuvasta huomataan, että apulauhduttimen teho ei täysin seuraa apulauhteen massavirtaa.



### 8.3 Rakennusaste

Rakennusasteella kuvataan sähkön tuotannon ja lämmöntuotannon suhdetta. Alla olevassa kuvassa on rakennusaste lämpötehon funktiona.

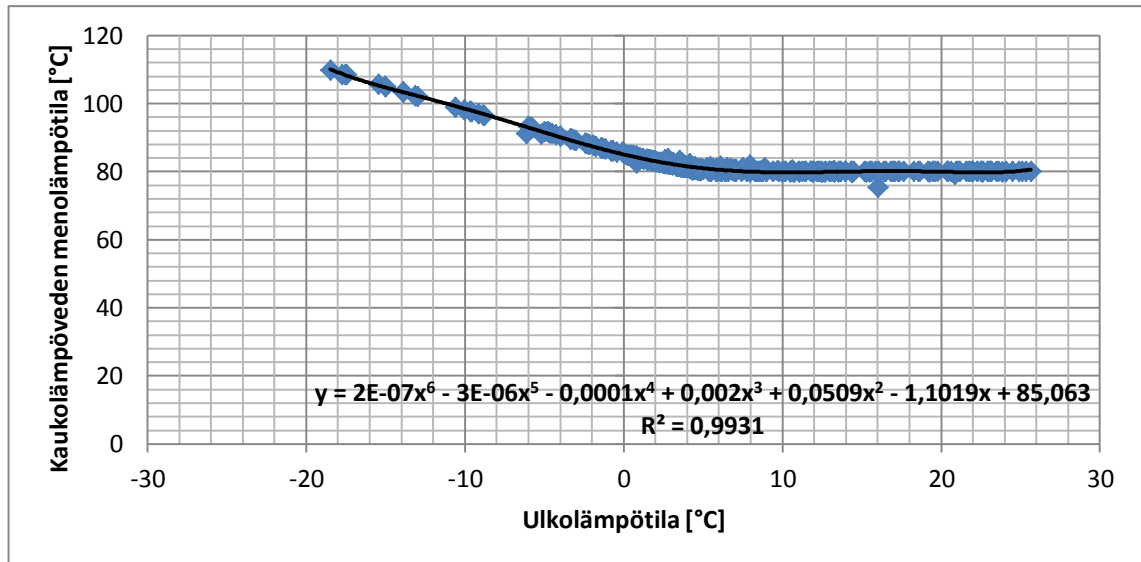


*Kuva 8.9: Rakennusaste tuotetun lämpötehon funktiona.*

Kuvasta nähdään rakennusasteessa olevan jonkin verran hajontaa, mutta suuremmilla lämpötehoilla rakennusaste tasoittuu aika hyvin välille 0,19–0,21. Laskenta antaa rakennusasteen kahden desimaalin tarkkuudella, joka aiheuttaa kuvan vaakasuuntaiset suorat.

### 8.4 Kaukolämpö

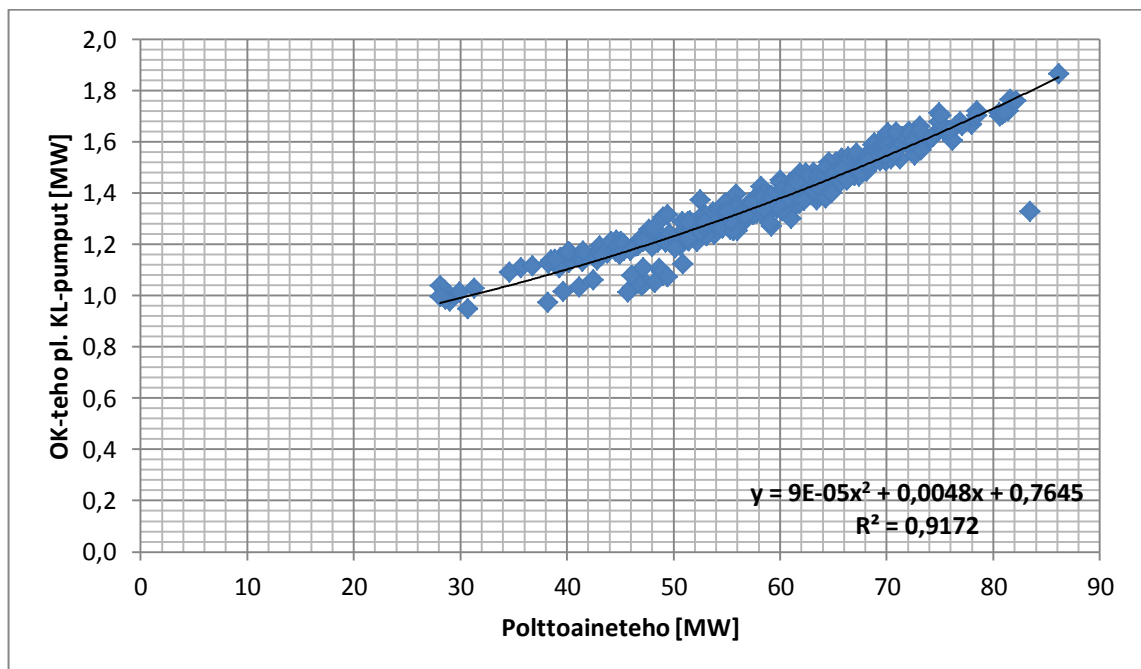
Kaukolämmön menoveden lämpötila saadaan ulkoilman lämpötilan funktiona, mikä on esitetty kuvassa 8.10. Menoveden lämpötila vaihtelee välillä 80–110 °C ulkolämpötilan mukaan. Kuvasta nähdään regressiokäyrän ja datan olevan erittäin hyvin linjassa, joka on huomattavissa myös korrelaatiokertoimen arvosta 0,9931.



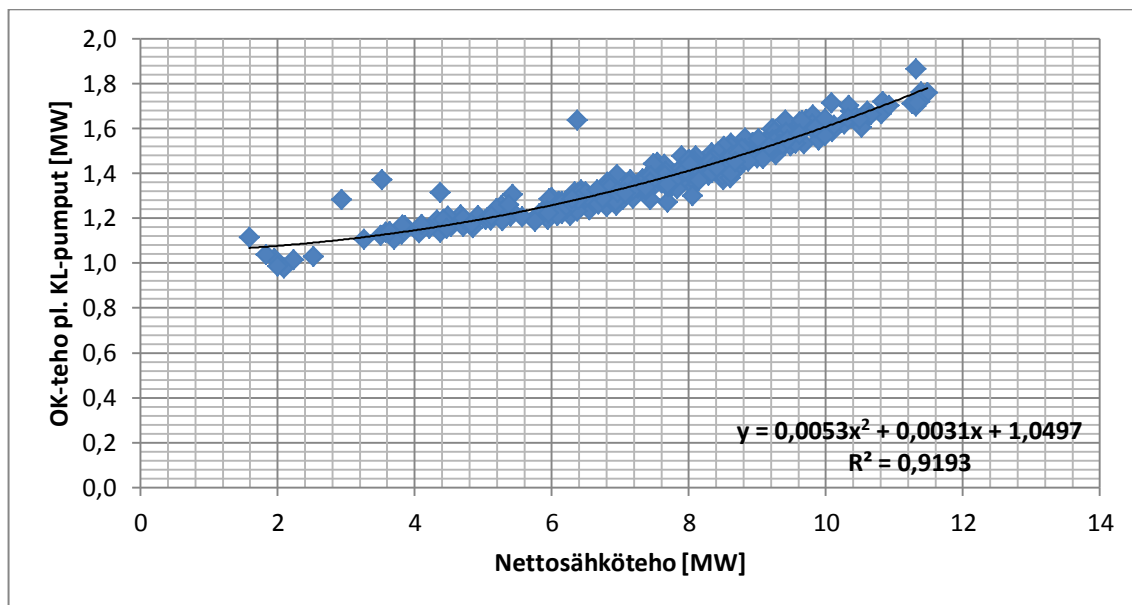
**Kuva 8.10:** Kaukolämmön menoveden lämpötila ulkolämpötilan funktiona.

## 8.5 Omakäyttösähkö

Omakäyttösähköllä tarkoitetaan voimalaitoksen käyntiin vaadittavaa sähkönkulutusta. Suurimpia sähkönkuluttajia ovat suurimmat puhaltimet ja pumput eli primääri-ilma- ja palamisilmapuhallin sekä syöttövesipumput. Omakäyttösähkön seuranta helpottaa laitteiden toiminnan seuraamista sekä prosessien optimoimista. Kuvassa 8.11 on esitetty omakäyttösähkö poislukien kaukolämpöpumppujen teho polttoainetehon funktiona ja kuvassa 8.12 on omakäyttösähkö poislukien kaukolämpöpumppujen teho nettosähkötehon funktiona. Kaukolämpöpumppujen tehoa ei ole huomioitu, jotta saadaan tarkempi kuva nimenomaan kattilan K8 omakäyttösähkön kulutuksesta.



**Kuva 8.11:** Omakäyttösähkö (pl. kaukolämpöpumput) polttoainetehon funktiona.



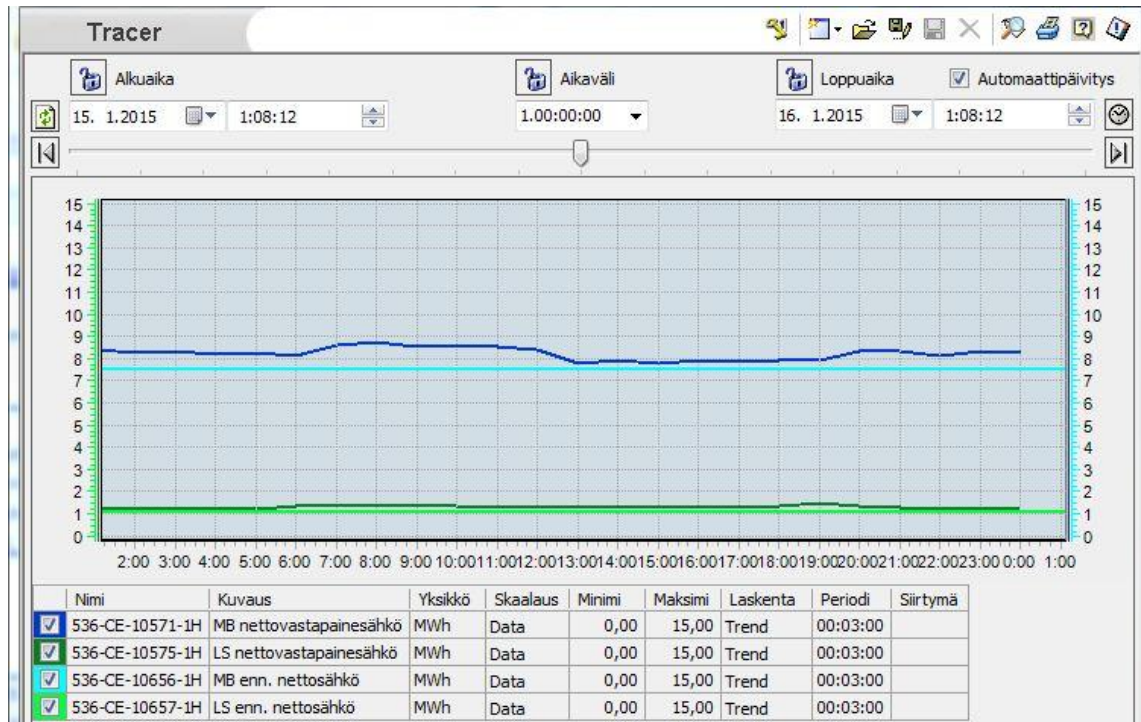
**Kuva 8.12:** Omakäyttösähkö (pl. kaukolämpöpumput) nettosähkötehon funktiona.

Molemmissa kuvissa huomataan korrelaatiokertoimienkin perusteella datan käyttäytymisen säännönmukaisesti. Omakäyttösähköteho nousee niin polttoainetehon kuin nettosähkötehonkin kasvaessa. Omakäyttösähkön kulutuksen minimin ja maksimin välinen ero on melko pieni alle 1 MW.

## 8.6 Nettosähköennusteen toteutuminen

Voimalaitoksella ennustetaan joka päivä Metsä Boardin höyrynkulutusta eri kohteissa, joita ovat 4,7 bar:n ja 12 bar:n höyrytehot sekä kaukolämpöteho, lisäksi päivitetään turbiinin käyntitieto. Leppäkosken Sähkö tekee oman ennusteensa kunnan kaukolämpöön liittyen. Lämpöennuste lähetetään Empower Oy:lle, jossa tehdään sähköntuotantoennuste Hämeenkyrön Voimalle.

Jos kartonki- tai paperikoneella tulee ennalta suunnittelemtomia pidempiä seisokkeja, tulee lämpö- ja sähköennuste päivittää. Voimalaitoksella turbiinin liittyvät sähköntuotanto-ongelmat tai yllättävät alasajot täytyy myös päivittää Empowerille.



**Kuva 5.13:** Metsä Boardin ja Leppäkosken Sähkön nettosähköennusteen toteutumisen trendi.

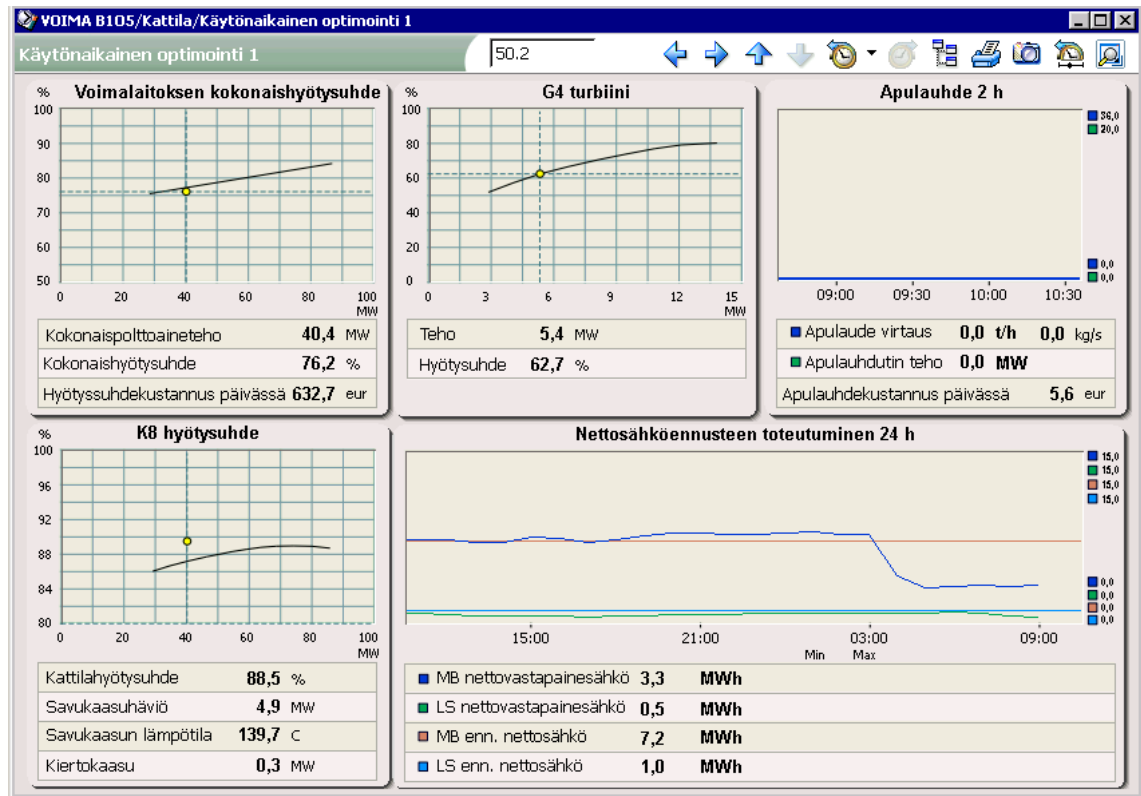
## 9 KÄYTÄNNÖN TOTEUTUS

Valvontasovelluksen suunnittelu aloitettiin määrittämällä voimalaitoksen energiatehokkuuden kannalta tärkeimmät kohteet. Toinen merkittävä kriteeri suureiden valinnassa oli mahdollisuus käytönaikaiseen optimointiin. Historiatiedoista kerättiin dataa eri suureista analysoitaviksi ja karsittiin pois kohteita, joista ei löytynyt selkeää vastetta. Luotiin erilaisia energiatehokkuusmittareita, joita on esitetty tarkemmin luvussa 8. Valvontasovelluksessa eri suureita seurataan joko tietyssä toimintapisteessä tai tietyn suureen funktiona.

Excel-taulukoissa esitetyt muuttujat sekä historiadatasta poimittujen tietojen perusteella saadut regressiosovitteet ohjelmoitiin Metso DNA –automaatiosovellukseen. Kuvaajat ohjelmoitiin toimintapistekuvaajina, jolloin operaattoreiden on helppo verrata valittujen muuttujien hetkellisarvoja sovitteeseen. Tällöin voidaan reagoida nopeasti erilaisiin päivittäisiin ajotilanteiden muutoksiin.

Testausvaiheessa ei automaatiojärjestelmään vielä lisätty hälytyksiä uusien näyttöjen osalta. Ne voidaan tarvittaessa lisätä jälkikäteen. Näytöistä voidaan myös piirtää trendejä, joiden avulla mahdollistetaan suureiden tarkempi seuranta. Testausvaiheeseen asti päätyi lopulta kolme näyttöä. Näistä on mahdollista luoda yksi päänäyttö operaattoreille päivittäiseen seurantaan, kun saadaan sopivimmat sovitteet valikoitua riittävän datan perusteella. Näytöt on esitetty kuvissa 9.1–9.3.

Historiatietojen perusteella kuvaajista on helppo seurata, miten laitos on käyttäytynyt erilaisissa tilanteissa. Tällöin energiatehokkuuden parannuspotentiaali on kätevämmän huomattavissa kuin vertaamalla ainoastaan referenssiarvoihin. Historiatiedoissa on mukana vain oleelliset ajotilanteet, ja ylösajo-, alasajo- ja häiriötilanteet on suodatettu datasta pois.



Kuva 9.1: Käytönaikaisen optimoinnin testausvaiheen ensimmäinen näyttö.

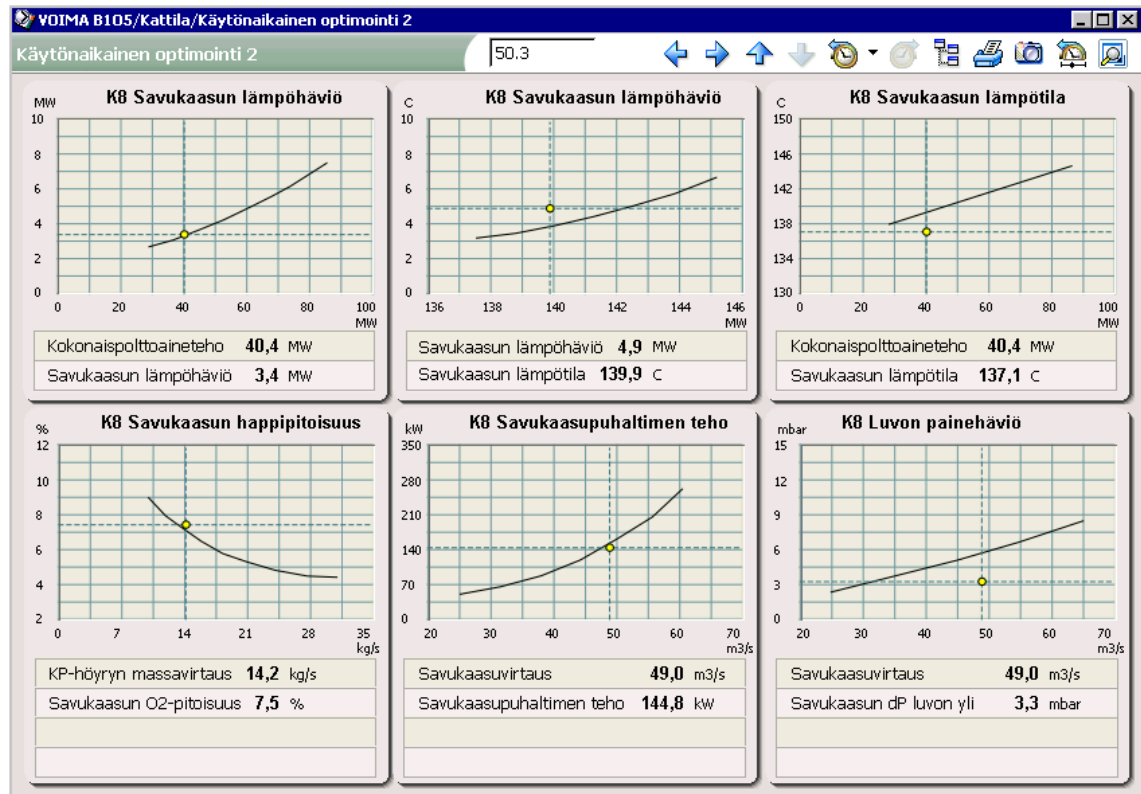
Ensimmäinen näyttö koostuu viidestä eri kuvaajasta, jotka koostuvat voimalaitoksen hyötysuhteen, kattilahyötysuhteen ja turbiinin hyötysuhteen seurannasta sekä apulauhduttimen käytöstä ja operaattorien päivittäin tekemän nettosähköennusteen toteutumisesta. Kuvaajien alapuolelle on laitettu vielä näkyviin kuvaajan suureiden hetkelliset arvot sekä muita hyödyllisiä hetkellisarvoja.

Voimalaitoksen kokonaishyötysuhteeseen on lisätty laskenta hyötysuhdekustannukselle, joka näyttää hetkellisarvon aiheuttaman kulun päivässä, mikäli hyötysuhde on tavoitearvon alapuolella. Vuosittaisen polttoaineen kulutuksen perusteella on saatu laskentavakio  $K_{hs\_vakio}$ , jonka avulla hyötysuhteen kustannukset  $K_{hyötysuhde}$  voidaan laskea. Lisäksi kustannusten laskentaan käytetään kokonaishyötysuhteen tavoitearvoa  $\eta_{tavoitearvo}$  ja voimalaitoksen hetkellistä hyötysuhdetta  $\eta_{voimalaitos}$  kaavan 9.1 mukaan

$$K_{hyötysuhde} = K_{hs\_vakio} (\eta_{tavoitearvo} - \eta_{voimalaitos}) . \quad (9.1)$$

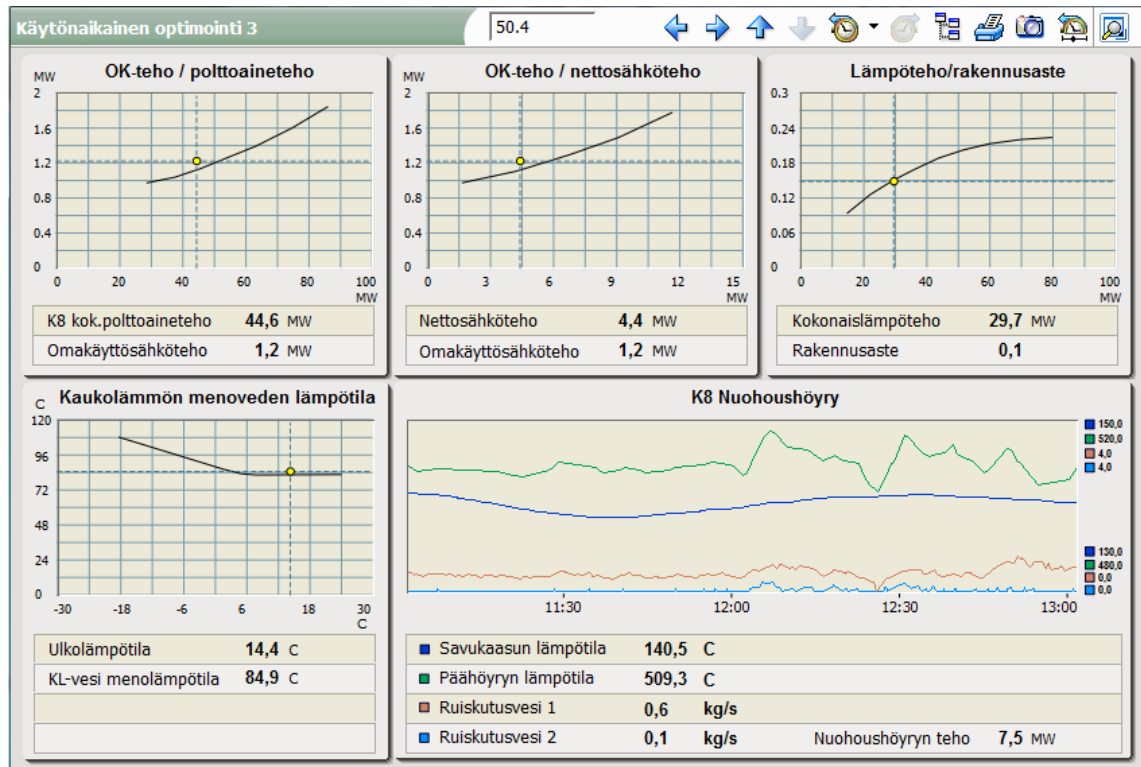
Apulauhdeajon aiheuttama päivittäinen kustannus on myös esitetty ensimmäisessä näytössä. Apulauhdeajon kustannus päivässä  $K_{apulauhde}$  on laskettu apulauhduttimen tehon  $P_{apulauhde}$  ja oletetun hukatun kustannuksen  $K_{hukka}$  avulla kaavan 9.2 mukaisesti

$$K_{apulauhde} = P_{apulauhde} K_{hukka} . \quad (9.2)$$



**Kuva 9.2:** Käytönaikaisen optimoinnin testausvaiheen toinen näyttö.

Toisessa näytössä esitetään savukaasun ominaisia arvoja eri mittapisteissä kuuden kuvaajan muodossa. Savukaasun lämpöhäviö on suurin yksittäinen kattilalahyötysuhteeseen vaikuttava häviöiden aiheuttaja. Siten se on myös tärkein käytönaikaiseen optimointiin vaikuttava tekijä. Kuvaajissa on esitetty savukaasun lämpöhäviö sekä polttoainetehon että savukaasun lämpötilan funktiona, savukaasun lämpötila polttoainetehon funktiona, happipitoisuus tuorehöyryn massavirran funktiona, savukaasupuhaltimen teho savukaasuvirtauksen funktiona ja luvon painehäviö savukaasuvirtauksen funktiona. Näistä tärkeimmät seurattavat ovat savukaasun happipitoisuus sekä lämpötila. Niiden alentaminen erityisesti pienillä kuormilla on olennainen tekijä käytönaikaisen optimoinnin saavuttamiseksi.



**Kuva 9.3:** Käytönaikaisen optimoinnin testausvaiheen kolmas näyttö.

Testivaiheen kolmannessa näytössä on viisi kuvaajaa, joita ovat omakäyttösähköteho sekä polttoainetehon että nettosähkötehon funktiona, rakennusaste tuotetun lämpötehon funktiona, kaukolämpöveden menolämpötila ulkolämpötilan funktiona ja trendi nuohoushöyryn ominaisuuksista sekä vaikutuksista. Omakäyttösähkötehon seuraamisella, erityisesti seisokkien aikana, voidaan paikallistaa laitteita, jotka kuluttavat sähköä turhaan. Erilaisia sähkölaitteita, pääasiassa pumppuja ja puhaltimia, jää helposti päälle rinnakkain useampia, joiden aiheuton sähkönkulutus voidaan eliminoida omakäyttösähkötehon kuvaajien perusteella.

## 9.1 Johtopäätökset

Valvontasovelluksen näyttöjen huomattiin helpottavan paremman energiatehokkuuden saavuttamista etenkin pienillä polttoainetehoilla. Pienillä polttoainetehoilla savukaasun jäännöshapen määrä on ollut kaksinkertainen normaaliin ajotilanteeseen verrattuna. Savukaasun happipitoisuutta voidaan pienentää automaatiojärjestelmästä O<sub>2</sub>-korjauskertoimella, primääri- ja palamisilman suhdetta säätämällä sekä vaiheistamalla palamisilman määrää sekundääri- ja tertiääritasoilla. Kuormapolttimien peltien välistä virtaava ilmamäärä vaikeuttaa ilman vaiheistamista pienillä kuormilla. Ilmamäärät sekundääri- ja tertiääritasoilla jäävät niin pieneksi verrattuna kuormapolttimien peltien välistä virtaavaan ilmamäärään, että vaiheistamisen vaikutuksia on vaikea havaita. Primääri- ja palamisilman suhdetta säätämällä pienemmäksi saadaan ilman vaiheistusta hieman toimivammaksi pienillä kuormilla kattilan jälkipalotilassa. Ilman vaiheistami-



seen ja hapen korjauskertoimeen käytettävät automaatiosovelluksen näytöt ovat esillä liitteessä kaksi.

Toinen merkittävä savukaasuhäviön suuruuteen vaikuttava tekijä on savukaasun loppulämpötila. Savukaasun loppulämpötilan alarajaksi on asetettu 140 °C kattilan toimittajan puolesta. Savukaasun lämpötilaa ohjaa primääri- ja palamisilman lämpötilan asetusarvot höyryluvojen jälkeen. Savukaasun lämpötilaa voidaan laskea säätämällä manuaalisesti näitä asetusarvoja. Kattilan toimittajan kanssa selvitetään kuinka alas savukaasun loppulämpötilaa laskea ilman happokastepisteen vaaraa.

Voimalaitoksella nuohotaan koko kattila kahdesti päivässä. Uudessa kattilassa ei ole esiintynyt vielä juurikaan likaantumista tulistimissa. Kattilan toimittajan kanssa voisi pohtia onko järkevää vähentää nuohouksen esiintymistäajuutta tai kestoja. Turpeen määrä polttoaineessa vaikuttaa myös tulistimien likaisuuteen, sillä turpeen polttaminen pitää kattilan puhtaampana.

## 10 YHTEENVETO

Tämän diplomityön tavoitteena oli luoda operaattoreille ja muulle henkilökunnalla sovellus Hämeenkyrön Voiman voimalaitoksen käytönaikaiseen optimointiin. Käytönaikaisella optimoinnilla tarkoitetaan jatkuvaa energiatehokkuuden parantamista, polttoaineen sisältämän energian tehokasta hyödyntämistä sekä päästöjen vähentämistä. Uusien näyttöjen avulla käyttöhenkilökunnan pitäisi tietää toimiiko laitos energiatehokkaasti kyseisessä toimintapisteessä.

Työ aloitettiin analysoimalla voimalaitoksen erityispiirteet ja valitsemalla potentiaalisia energiatehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä, joiden toimintaan voitaisiin vaikuttaa käynnin aikana. Historiatiedoista kerättiin tietoja halutuista suureista taulukkomuotoon ja piirrettiin niistä kuvaajia. Kuvaajien perusteella karsittiin pois mittarit, joiden avulla ei voida vaikuttaa käytönaikaiseen optimointiin tässä työssä käytetyillä menetelmillä. Dataa kerättiin ajanjaksolta, joka kuvaa kattavasti voimalaitoksen kaikkia käyntitilanteita. Mittareista valittiin olennaisimmat ja ohjelmoitiin seurattavaksi automaatiojärjestelmään testausvaiheeseen.

Testausvaiheessa todettiin sovelluksen toimivan tarkoituksen mukaisesti erityisesti pienillä kuormilla ajettaessa, jolloin parantamisen varaa oli ennestään eniten. Erityisesti savukaasun happipitoisuuden ja loppulämpötilan seuranta sai operaattorit kiinnittämään enemmän huomiota käytönaikaiseen optimointiin. Todettiin sovelluksen tuottavan tavoiteltua informaatiota ja lisäävän jatkuvaa huomion kiinnittämistä energiatehokkuuteen.

Käytönaikainen optimointi ja jatkuva energiatehokkuuden seuraaminen eri toimintapisteissä mahdollistaa vertailun vastaavien kuormien ja vuodenaikojen välillä. Työssä tuotiin esille potentiaalisia kohteita energiatehokkuuden parantamiseen, joiden avulla on mahdollista saavuttaa taloudellista hyötyä pitkällä aikavälillä. Käytönaikaisella optimoinnilla ja jatkuvalla energiatehokkuuden seurannalla parannetaan laitoksen hyötysuhdetta, säästetään polttoainekustannuksissa sekä löydetään voimalaitoksen optimaaliset ajomallit eri toimintapisteissä.

## LÄHTEET

- [1] Metsä Board Oyj. Board Mill Metsä Board Kyro. 2014. [WWW]. [Viitattu 31.1.2014]. Saatavissa <http://www.metsaboard.com/company/productionunits/kyro/Pages/Default.aspx>
- [2] Pohjolan Voima Oy. Hämeenkyrön biovoimalaitoksen esittely. 2012. [WWW]. [Viitattu 31.1.2014]. Saatavissa [http://www.pohjolanvoima.fi/filebank/23985-Hameenkyron\\_biovoimalaitos.pdf](http://www.pohjolanvoima.fi/filebank/23985-Hameenkyron_biovoimalaitos.pdf)
- [3] Knowenergy. Energiatekniikan oppimisympäristö. 2012. [WWW]. [Viitattu 4.2.2014]. Saatavissa <http://www.knowenergy.net/>
- [4] Metso Oy. Lehdistötiedote. 2011. [WWW]. [Viitattu 13.2.2014]. Saatavissa <http://www.metso.com/news/newsdocuments.nsf/Web3NewsDoc/72D03CD2E84C31DCC22578F1002EAB53?OpenDocument&ch=ChMetsoWebFin&id=72D03CD2E84C31DCC22578F1002EAB53&#.Uk8wpYb3qSo>
- [5] Raiko, R., Saarenpää I. 2011. Höyrytekniikka. Luentomoniste. Tampereen teknillinen yliopisto, Energia- ja prosessitekniikan laitos. 252 s.
- [6] Mills, A. F. Basic Heat and Mass Transfer. 2. painos. 1999. Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall. 1000 s.
- [7] Raiko, R. 2011. Voimalaitostekniikka. Luentomoniste. Tampereen teknillinen yliopisto, Energia- ja prosessitekniikan laitos. 248 s.
- [8] Sairanen, I. 2013. Kattilan suorituskysyn seuranta. Loppudokumentaatio. Metso Automation Oy. 32 s.
- [9] Raiko, R. & Kirvelä, K. 2009. Energiatekniikan perusteet. Luentomoniste. Tampereen teknillinen yliopisto, Energia- ja prosessitekniikan laitos. 174 s.
- [10] Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P. & Pakkanen, H. 1997. Höyrykattilatekniikka. Opetushallitus. 315 s.
- [11] Lammi, M. 2013. Tuotannon valvonta ja raportointi. Loppudokumentaatio. Metso Automation Oy. 45 s.

- [12] DIN EN 12952-15. 2003. Water-tube boilers and auxiliary installations – Part 15: Acceptance tests. DIN-adopted European Standard. 90 s.
- [13] Zenger, P. 2002. The Use of Energy Analysis for Defining the Energy Efficiency of a Power Plant. Research for a Licentiate's Thesis. 68 s.
- [14] DIN 1942. Abnahmeversuche an Dampferzeugern (VDI-Dampferzeugerregeln) : Deutsche Norm. DIN Deutsches Institut für Normung. 77 s.
- [15] Lyytikäinen, R., Mielonen, P., Raiko, M. & Vessonen, K. 1991. Voimalaitoksen hyötysuhteeseen vaikuttavat tekijät. Helsinki. Imatran Voima Oy. 66 s.
- [16] Kara, M., Kärkkäinen, S. & Viinikainen, S. 1998. Voimalaitosten omakäyttösähkön määrittely. Helsinki. Oy Edita Ab. 84 s.
- [17] Wikstén, R. 2009. Lämpövoimaproessit. Otatieto Helsinki University Press. 164 s.
- [18] Cengel, Y. & Boles, M. 2006. Thermodynamics: An Engineering Approach. 5. painos. McGraw-hill. Boston. 988 s.
- [19] Tuomainen, R. 2012. Suunnitteluarvot ja suorituskky. Loppudokumentaatio. Andritz Pulp & Paper Oy. 11 s.
- [20] Power Technology. Örnköldsvik Power plant. [WWW]. [Viitattu 24.2.2015]. Saatavissa <http://www.power-technology.com/projects/ornskoldsvik/ornskoldsvik2.html>
- [21] Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. 2002. Poltto ja palaminen. 2. painos. Jyväskylä. Gummerus Kirjapaino Oy. 750 s.
- [22] Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T. & Urpalainen, S. 2008. Voimalaitostekniikka. Keuruu. Otavan Kirjapaino Oy. 342 s.
- [23] Pohjolan Voima Oy. Hämeenkyrön biovoimalaitoksen polttoainevalikoimaa täydennetään. [WWW]. [Viitattu 16.3.2015]. Saatavilla [http://www.pohjolanvoima.fi/yritys/media/uutiset/283/hameenkyron\\_biovoimalaitoksen\\_polttoainevalikoimaa\\_taydennetaan](http://www.pohjolanvoima.fi/yritys/media/uutiset/283/hameenkyron_biovoimalaitoksen_polttoainevalikoimaa_taydennetaan)
- [24] Pitkänen, A. 2011. ENER-6010 Polttotekniikan harjoitukset. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto. 87 s.

- [25] Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Espoo. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, VTT. 196 s. [WWW]. [Viitattu 17.3.2015]. Saatavilla <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf>
- [26] Kolsi, A. 2007. Kiinteän biopolttoaineen palaminen. Saarijärvi. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, VTT. 21 s.
- [27] Holmberg, H. 2007. Biofuel Drying As A Concept to Improve The Energy Efficiency Of An Industrial CHP Plant. Espoo. Teknillinen Korkeakoulu, TKK. ISBN 978-951-22-8649-2. 63s. + julkaisut 62s.
- [28] Kivimäki, T. & Tikka, O.. 2013. Hämeenkyrön Voima Oy, Kattilan K8 takuumittaukset. Pöyry Finland Oy. 17 s. + liitteet 124 s.
- [29] Oksanen, A. 2006. ENER-1200 Ilmansuojelu. Luentomoniste. Tampereen teknillinen yliopisto, Energia- ja prosessiteknikan laitos.
- [30] Coskun, C., Oktay, Z. & Ilten, N. 2009. A New Approach For Simplifying The Calculation Of Flue Gas Specific Heat And Specific Energy Value Depending On Fuel Composition. Energy Journal, Volume 34, Issue 11, s. 1898-1902.
- [31] Belegundu, A. & Chandrupatla, T. 1999. Optimization Concepts and Applications in Engineering. Prentice Hall. s. 432.
- [32] VTT Energia. Energia Suomessa. Tekniikka, talous ja ympäristövaikutukset. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT. Helsinki. Edita. 396 s.
- [33] Patterson, M. 1996. What is Energy Efficiency. Energy Policy, Volume 24, Number 5, s. 377-390.
- [34] Koski, K. 2010. Energiatehokkuuden parantaminen edellyttää sen mittaamista. Enertec 2-3/2010. 1 s. [PDF]. [Viitattu 10.4.2015]. Saatavilla <http://www.indmeas.com/julkaisut>
- [35] Laukkanen, V. 2011. Energiantuotannon optimointi edellyttää hyvää mittauslaatua. Promaint 6/2011. 2 s. [PDF]. [Viitattu 10.4.2015]. Saatavilla <http://www.indmeas.com/julkaisut>
- [36] Heikkilä, I., Huumo, M., Siitonen, Sari., Seitsalo, P. & Hyytiä, H. 2008. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT), Teollisuuden energiatehokkuus. Suomen ympäristökeskus, SYKE. 88 s. [PDF]. [Viitattu 10.4.2015]. Saatavilla [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38378/SY\\_51\\_2008.pdf?sequence=1](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38378/SY_51_2008.pdf?sequence=1)

- [37] Mellin, I. 2006. Tilastolliset menetelmät: Lineaarinen regressioanalyysi. Opintomoniste. Helsingin yliopisto. 203 s. [PDF]. [Viitattu 24.4.2015]. Saatavilla <http://math.aalto.fi/opetus/sovtodb/oppikirja/Regranal.pdf>
- [38] Laininen, P. 1998. Todennäköisyys ja sen tilastollinen soveltaminen. Otatieto. Helsinki. 308 s.
- [39] Joronen, T., Kovács, J. & Majanne, Y. 2007. Voimalaitosautomaatio. Suomen Automaatioseura Ry. Helsinki. 276 s.

## LIITE 1: LASKENTALISÄYKSET



Kyro  
Petri Niemelä  
Matias Hytti

HVO KVVJ-laskentalisäyksiä  
04.06.2015

1(66)

## HVO KVVJ-LASKENTALISÄYKSIÄ

## SISÄLLYS

1	OMAKÄYTTÖSÄHKÖTEHO .....	2
2	LÄMPÖTEHO YHTEENSÄ .....	2
3	KOKONAISHYÖTYSUHDE .....	2
4	APULAUHDE .....	3

4.	4.6.2015	M.Hytti		Positiot hetkellisarvoiksi
3.	20.5.2015	M.Hytti		Lisäys kustannuslaskelmiin.
2.	11.5.2015	P.Niemelä		Korjaus kustannuslaskelmiin.
1	28.4.2015	P.Niemelä		Luotujen HI-laskentojen positiolisäykset
0.	18.3.2015	M.Hytti, P.Niemelä		Ensimmäinen versio
Versio	Pvm.	Tekijä	Hyväksyjä	Muutos



Kyro  
Petri Niemelä  
Matias Hytti

HVO KVV-laskentalisäyksiä  
04.06.2015

2(66)

### 3 OMAKÄYTTÖSÄHKÖTEHO

Lisätään KVV laskenta ja historiankeruu:

$[OK\text{-teho MW}] = [Lask.\text{ laitoksen OK-teho MW}] - [KL\text{-pumppujen sähkönkulutus MW}]$

$[OK\text{-teho}] = 536\text{-CE-10402}$

$[Lask.\text{ laitoksen OK-teho}] = 536\text{-CE-10401}$

$[KL\text{-pumppujen sähkönkulutus}] = 539\text{-CE-10402}$

### 2 LÄMPÖTEHO YHTEENSÄ

Lisätään KVV laskenta ja historiankeruu:

$[Lämpöteho yhteensä MW] = [MB:n\text{ kaukolämpöteho MW}] + [LS:n\text{ kaukolämpöteho MW}] + [12\text{ bar nettohöyryteho tehtaalle MW}] + [4,9\text{ bar nettohöyryteho tehtaalle MW}]$

$[Kokonaislämpöteho] = 595\text{-CQ-10416}$

$[MB:n\text{ kaukolämpöteho}] = 535\text{-CQ-10411}$

$[LS:n\text{ kaukolämpöteho}] = 595\text{-CQ-10412}$

$[12\text{ bar nettohöyryteho tehtaalle}] = 233\text{-CQ-10429}$

$[4,9\text{ bar nettohöyryteho tehtaalle}] = 332\text{-CQ-10431}$

### 3 KOKONAISHYÖTYSUHDE

Lisätään KVV laskenta ja historiankeruu:

Kokonaishyötysuhteeseen kustannusten (€) laskenta, kun hyötysuhde alle 82 %.

$[Kustannukset\ päivässä\ €] = 356,13\text{ €/}\% * (82\% - [Kokonaishyötysuhde\ \%])$

$[Kokonaishyötysuhteen\ kustannus\ päivässä] = 400\text{-CQ-10401}$

$[Kokonaishyötysuhteen\ kustannus\ päivässä] = 400\text{-CQ-10401-1H}$





Kyro  
Petri Niemelä  
Matias Hytti

HVO KVV-laskentalisäyksiä  
04.06.2015

3(66)

[Kokonaishyötysuhde] = 400-CX-10455

Huom! Laskennassa esiintyvät vakiot toteutetaan operoitavana KVV:ssä.  
[Laskentavakio kokonaishyötysuhde] = 356,13 €/°  
[Nimellinen kokonaishyötysuhde] = 82 %

#### 4 APULAUHDE

Lisätään KVV laskenta ja historiankeruu:

[Kustannukset päivässä €] = [Apulauhduttimen teho netto MW] \* 552 €/MW

[Apulauhteen kustannus päivässä] = 535-CQ-10417

[Apulauhteen kustannus päivässä] = 535-CQ-10417-1H

[Apulauhduttimen teho netto] = [535-CQ-10446]

Huom! Laskennassa esiintyvät vakiot toteutetaan operoitavana KVV:ssä.  
[Laskentavakio apulauhde] = 552 €/MW

## LIITE 2: SAVUKAASUN O<sub>2</sub>-PITOISUUDEN KORJAUSKERROIN SEKÄ PRIMÄÄRI- JA PALAMISILMAN SUHDESÄÄTÖ

